

дуктивности (чисто активное сопротивление контура), ток дуги  $i_d$  дважды прерывается за полупериод (рис. 4.6,а), так как дуга может гореть лишь в тот отрезок времени, когда напряжение  $U_c$  больше напряжения, требуемого для поддержания горения дуги  $U_d$ . С момента зажигания дуги  $t_1$  в цепи появляется ток  $i_d$ . При увеличении силы тока ионизация в области дугового разряда вследствие нагрева усиливается, и проводимость дуги существенно возрастает. Поэтому напряжение  $U_d$ , необходимое для поддержания дуги, уменьшается и на ВАХ дуги появляется горизонтальный участок. Напряжение мощной дуги с учетом горизонтального участка ВАХ может иметь форму, сильно отличную от синусоиды. В результате появления несинусоидальных периодических токов и напряжений в питающей сети возникают высшие гармоники, снижающие энергетические показатели установки, вызывающие радиопомехи и т.п. При большой силе тока напряжение дуги стабилизируется и уже от него не зависит.

При наличии в цепи индуктивного сопротивления ток и напряжение дуги изменяются по кривым, представленным на рис.4.6,б. Когда напряжение сети снизится до нуля, ток в дуге будет протекать за счет энергии, накопленной в индуктивности цепи. В момент перехода тока  $i_d$  через нуль напряжение сети  $U_c$  превысит напряжение зажигания  $U_3$  и дуга вновь загорится. В данном случае ток дуги будет протекать непрерывно, а кривая её напряжения представляет собой ряд прямоугольников без разрыва.

Таким образом, наличие индуктивности в цепи горячей дуги стабилизирует последнюю.

Условие непрерывного горения дуги заключается в том, чтобы при переходе тока через нуль напряжение источника питания было равно или превосходило напряжение зажигания дуги, т.е.

$$U_d = U_m \cdot \sin \varphi \geq U_3 \quad (4.6)$$

где  $U_m$  - амплитудное значение напряжения источника питания.

Дуга будет гореть непрерывно, если  $\cos \varphi \leq 0,85$ .

В электропечных установках мощностью до 10 МВ·А для стабилизации дуги увеличивают индуктивность цепи включением реактора. При мощности трансформатора свыше 10 МВ·А, а также при работе печи на жидкой завалке, искусственно-го увеличения индуктивности не требуется, поэтому реакторы не применяют.

#### Вопросы для самопроверки

1. Какие процессы протекают в электрической дуге?
2. Что такое вольт-амперная характеристика дуги постоянного тока и какой ее вид?
3. Какими способами можно зажечь дугу постоянного тока?
4. В каком случае дуга постоянного тока будет гореть устойчиво?
5. Какими способами можно регулировать ток дуги постоянного тока?
6. В чём особенность горения дуги переменного тока?
7. При каком коэффициенте мощности дуга будет гореть устойчиво?
8. В каких случаях увеличивают индуктивность для стабилизации дуги?

## 4.2 Дуговые сталеплавильные печи

**4.2.1 Назначение, конструкция и работа дуговых печей.** Дуговыми называют электротермические установки, источником тепла в которых является дуга, свободно горящая в атмосфере воздуха, в газовой среде или вакууме.

Электродуговой нагрев широко используется для плавки высококачественных сталей, цветных и тугоплавких металлов, производства ферросплавов и плавящихся огнеупоров, для получения некоторых продуктов в химической промышленности (желтого фосфора).

ГОСТами предусмотрены дуговые сталеплавильные печи емкостью 0,5; 3,0; 6,0; 12,0; 25; 50, 100, 200, 300, 400 т. Условно их подразделяют на печи: *малой емкости* (до 6 т), *средней емкости* (12-50 т) и *большой емкости* (100 т и выше).

Дуговые печи бывают прямого, косвенного и смешанного нагрева.

В печах *прямого нагрева* (рис.4.7,а) дуга 2 горит между электродами 1 и расплавленным металлом 3, который является одним из участков электрической цепи. Тепло передается от дуги непосредственно металлу, поэтому в печах прямого нагрева плотность потока энергии к металлу может достигать очень больших значений. Такими печами выполняются сталеплавильные, вакуумные и плазменные.

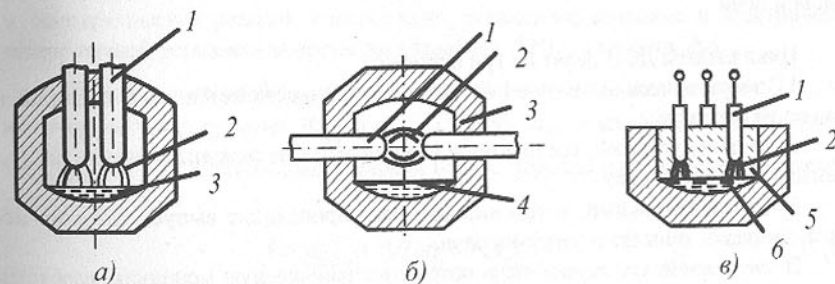


Рисунок 4.7 – Схемы дугового нагрева

В печах *косвенного нагрева* (рис.4.7,б) дуга 2 горит между электродами 1, а расплавленному металлу 4 тепло от дуги передается обычно излучением (в отдельных случаях – частично конвекцией и теплопроводностью).

В печах *смешанного нагрева* (рис.4.7,в) дуга 2 горит в газовой полости внутри расплавленной шихты 5, включенной последовательно или параллельно с дугой; расплав 6 собирается в поддоне. В этих печах тепло выделяется как в дуге, так и в электрическом сопротивлении шихты (их называют также дуговыми печами сопротивления). По способу загрузки дуговые сталеплавильные печи (ДСП) разделяются на печи с боковой загрузкой через рабочее окно и печи с верхней загрузкой.

На рис.4.8 представлен примерный график изменения мощности и напряжения ДСП при выплавке стали (для печи средней ёмкости).

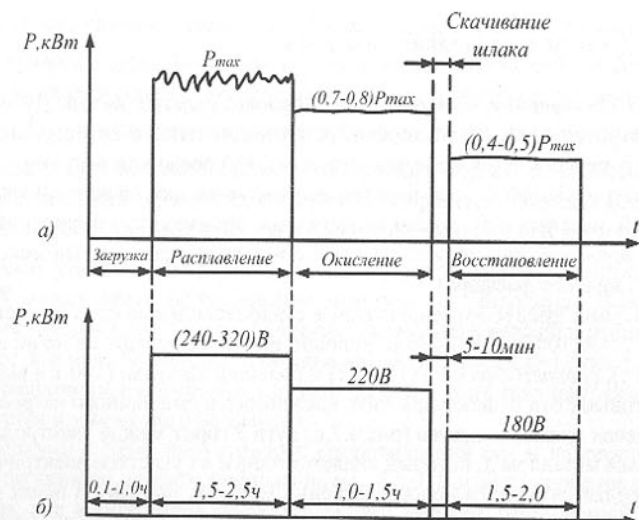


Рисунок 4.8 – График мощности (а) и напряжения (б) дуговой сталеплавильной печи

Цикл работы ДСП делят на три периода:

- 1) энергетический, в течение которого осуществляется нагрев шихты и плавление металла;
- 2) технологический, состоящий в свою очередь из окислительного и восстановительного периодов;
- 3) вспомогательный, в течение которого происходит выпуск готового металла, заправка, очистка и загрузка печи.

В энергетический период печь потребляет наибольшую мощность, необходимую для прогрева шихты и для покрытия скрытой теплоты её плавления. Длительность этого периода составляет 50-60% общей длительности процесса плавки, а расход электроэнергии равен 60-80% энергии, потребляемой за всю плавку. Режим горения дуг в этот период крайне нестабилен, сопровождается частыми короткими замыканиями (100 и более) и обрывами дуги; мощность дуги резко колеблется.

Поскольку в период расплавления дуги очень короткие и хорошо заэкранированы холодной шихтой, напряжение питания и выходная мощность печного трансформатора могут быть приняты максимальными, чем сокращается продолжительность этого периода.

В окислительный период происходит обезуглероживание металла до определенного предела, удаление фосфора и частично серы, дегазация и рафинирование. Окисление углерода вызывает энергичное кипение металла. В этот период потребляемая мощность идет в основном на восполнение части тепловых потерь и составляет примерно 60% номинальной. Длина дуги увеличивается, напряжение и потребляемая мощность уменьшаются. В связи с бурным кипением металла в этот период также возможны короткие замыкания электродов, находящихся близко от поверхности металла.

В восстановительный период происходит раскисление, десульфурация и легирование металла. Потребляемая мощность в этот период составляет примерно 50% номинальной.

Таким образом, схема электроснабжения ДСП должна обеспечивать достаточно широкое и плавное регулирование мощности по периодам плавки, а также в пределах каждого периода от  $S_{ном}$  до  $S_{min}$ . Отношение  $S_{ном}/S_{min}$  называют глубиной регулирования мощности, значение которой колеблется от 3 до 10. Большие значения соответствуют крупным печам.

В настоящее время в Украине в эксплуатации находятся дуговые печи для выплавки стали емкостью до 200 т, питаемые от трансформаторов мощностью до 80 МВ·А.

**Упрощенный энергетический баланс ДСП.** Выбор электрооборудования производится по режиму наибольшей мощности; поэтому баланс рассматривают для периода расплавления.

В тепловой баланс входят: тепло дуги и энергия экзотермических реакций, протекающих в период плавки (горение углерода электродов, окислительные реакции с выделением тепла, как, например, угар железа).

Основные составляющие расхода энергии: полезная энергия на расплав твердой или жидкой завалки; полезная энергия на подогрев металла, шлакообразующих и эндотермических реакций в ванне печи; суммарные тепловые и электрические потери печной установки за время расплавления  $\Delta P \cdot t_p$  и простоя  $\Delta A_{пр}$ .

Полезная энергия  $\Delta A_{пол}$ , необходимая для нагрева и расплавления  $G$  т стали при твердой завалке, равна  $A_{пол} = a_{уд} \cdot G$ . Здесь  $a_{уд}$  – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т. Упрощенный тепловой баланс периода расплавления выражается уравнение

$$A = A_{пол} + \Delta P \cdot t_p + \Delta A_{пр}. \quad (4.7)$$

Мощность трансформатора ДСП для твердой завалки выбирается по величине  $A$ , поскольку в последующие периоды плавки печь потребляет меньшую мощность:

$$S_{тр} = \frac{A}{t_p \cdot k \cdot \cos \varphi}, \quad (4.8)$$

где  $t_p$  – чистое время расплавления (суммарная длительность работы печи под током при расплавлении), ч;

$k = 0,8-0,9$  – коэффициент использования мощности печного трансформатора в период расплавления; он учитывает:

а) недоиспользование полной мощности трансформатора при работе на пониженном напряжении, а также вследствие отклонений фактических параметров режима печи (силы тока и напряжения дуги) от заданных, в частности, за счет несовершенства системы автоматического регулирования мощности печи;

б) некоторую несимметрию мощности отдельных фаз.

Для трансформатора, допускающего в период расплавления перегрузку, значение коэффициента  $k$  повышается.

В современных печах суммарное время расплавления от момента включения до окончания расплавления равно: 1,25-1,75 ч для печей емкостью до 6т; 1,5-2,5 ч для печей емкостью 12-50 т и 2,5-3,5ч – для печей емкостью 100-200 т.

Расчетное значение коэффициента мощности печной установки -  $\cos \varphi = 0,85$ .

**4.2.2 Электрооборудование дуговых печных установок.** Электродуговая печь представляет собой мощный электропотребитель, относящийся ко второй категории по надежности электроснабжения (допускают перерыв в подаче энергии не более 30 минут). Выпускаемые промышленностью ДСП имеют высокую степень комплектности и заводской готовности.

В комплекте с печью емкостью 6-200 т поставляется следующее оборудование (комплектные устройства и узлы): электропечной трансформатор; регулятор мощности, щиты и пульты управления и контроля; короткая сеть, включающая шинопроводы низшего напряжения в собранном виде и гибкие кабели в готовом виде с наконечниками; программирующее устройство для управления электрическим режимом; устройство для электромагнитного перемешивания металла печей емкостью 25-200 т, поставляемое комплектно с источником питания, станциями управления и гибким токопроводом; комплектное распределительное устройство (КРУ) напряжением до 35 кВ с печными выключателями; источники питания оперативного постоянного тока. Схема электрических соединений ДСП приведена на рис.4.9.

*Печные трансформаторы 5* предназначены для питания дуговых печей. Для печей небольшой и средней мощности трансформаторы выполняют трехфазными. Для печей большой мощности применяются группы однофазных трансформаторов, которые позволяют получить повышенный коэффициент мощности за счет более рациональной конструкции короткой сети и регулировать независимо мощность и напряжение каждой фазы.

Электропечные трансформаторы вследствие особых условий работы имеют ряд особенностей, отличающих их от обычных силовых трансформаторов. Наиболее существенными особенностями можно считать:

- 1) большой номинальный ток на стороне вторичного напряжения, достигающий от нескольких тысяч до десятков тысяч ампер;
- 2) повышенный коэффициент трансформации (напряжение с 6,10,35,110 кВ трансформируется до нескольких сотен вольт);
- 3) большой диапазон регулирования напряжения и использования большого числа ступеней напряжения (напряжение регулируется примерно на 500 % при числе ступеней до 40 и более);
- 4) повышенное значение напряжения короткого замыкания, что необходимо для ограничения тока короткого замыкания до  $(2,5-3,5) I_n$ ;
- 5) повышенная механическая прочность крепления обмоток и отводов ввиду частых толчков тока короткого замыкания.

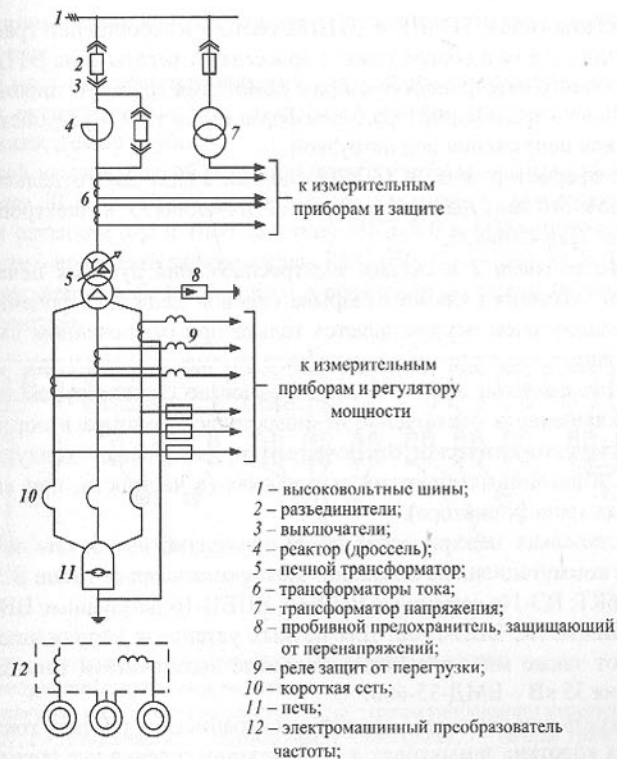


Рисунок 4.9 – Схема электрических соединений дуговой печной установки

Применяют печные трансформаторы двух типов - стержневой и броневой. Обмотки трехфазных трансформаторов соединяют по схеме “звезда-треугольник” с переключением на “треугольник-треугольник”, что даёт возможность вдвое увеличить диапазон рабочих напряжений.

В установках ДСП малой и средней емкости переключение ступеней вторичного напряжения печного трансформатора чаще всего осуществляется без нагрузки (ПБВ), а при мощности выше 16 МВА напряжение регулируется под нагрузкой (РПН).

Дуговые сталеплавильные печи комплектуются трансформаторами типов ЭТЦП, ЭТЦН, ЭТЦ и трансформаторными агрегатами типов ЭТМПК, ЭТЦПК, ЭТЦНК. Обозначение трансформаторов расшифровывается следующим образом: Э – электропечной; Т – трехфазный; М – с естественным масляным охлаждением и принудительной циркуляцией; Ц – с масляно-водяным охлаждением и принудительной циркуляцией масла; П – с переключателем для регулирования напряжения при снятой нагрузке; Н – с регулированием напряжения под нагрузкой; К – комплектный (состоящий из нескольких устройств); после типа указывается мощность в кВА и напряжение первичной обмотки в кВ.

Агрегаты типов ЭТМПК и ЭТЦПК состоят из собственно трансформатора и размещенного с ним в общем кожухе дросселя. Агрегаты типа ЭТЦНК состоят из регулировочного автотрансформатора с обмотками грубой и тонкой регулировки, электропечного трансформатора, трансформаторов тока и устройства переключения ступеней напряжения под нагрузкой.

Трансформатор печи ДСП-200 выполнен в виде двух отдельных агрегатов – регулировочного автотрансформатора АТЦН-45000/35 и электропечного трансформатора ЭТЦ-45000/35.

*Разъединители 2* в схемах электроснабжения дуговых печных установок служат для создания видимого разрыва силовой цепи электропечи. Коммутация цепи разъединителем осуществляется только при отключенном высоковольтном выключателе.

*Высоковольтные выключатели 3* совместно с аппаратурой защиты обеспечивают включение и отключение печного трансформатора в нормальных режимах, а также автоматическое отключение при длительных эксплуатационных перегрузках и аварийных коротких замыканиях (в частности, при внутренних повреждениях трансформатора).

В установках электрических печей применяют выключатели, рассчитанные на частые коммутационные операции: *электромагнитные* типов ВЭМ-10К, ВЭМ-10Э, ВМ-6КТ, ВЭ-10; *вакуумные* ВНВ-10, ВНВП-10; *воздушные* ВВ-10П, ВВ-10К, ВВ-35П, ВВП-35К, ВВП-110Б. Для печных установок напряжением 6 или 10кВ используют также многообъемные масляные выключатели типа ВМБ-10, а для напряжения 35 кВ – ВМД-35-600.

*Дроссель или реактор 4* служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. Значение относительного индуктивного сопротивления дросселей равно 5-30%. В печных установках применяют трансформаторы и дроссели, изготовленные в виде отдельных аппаратов, и трансформаторы со встроенными дросселями.

*Короткая сеть 10* дуговых печей служит для передачи электрической энергии от вторичной обмотки печного трансформатора в рабочее пространство печи. Несмотря на небольшую длину короткой сети, её активное и особенно индуктивное сопротивление оказывают существенное влияние на энергетические показатели работы печи: мощность, коэффициент мощности, энергетический КПД и т.д.

К короткой сети предъявляют следующие требования:

1) возможно меньшая её длина и наиболее рациональная транспозиция проводников с целью снижения индуктивного сопротивления, равномерной загрузки их током и получения одинаковых электрических параметров всех фаз;

2) минимальная стоимость эксплуатации короткой сети.

Короткую сеть ДСП независимо от её ёмкости и мощности установленного печного трансформатора можно условно разделить на четыре основных участка (рис. 4.10):

1) шинный мост (от выводов низкого напряжения печного трансформатора до неподвижных башмаков);

2) гибкая часть (участок гибких кабелей);

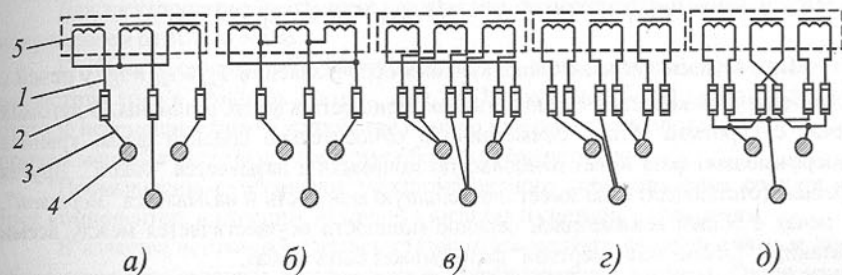
3) трубошины (от подвижных башмаков до головок электрододержателей);

4) электроды.

Шинный мост выполняется медными шинами прямоугольного сечения с естественным их охлаждением, а при токах 50 кА и выше взамен шин применяют медные водоохлаждаемые трубы.

Для гибкой части короткой сети применяются гибкие медные кабели. В гибких токопроводах ДСП малой и средней ёмкости, как правило, применяются голые медные кабели сечением 500 и 1000 мм<sup>2</sup> типа МГЭ-500 и МГЭ-1000, а для печей большой ёмкости – водоохлаждаемые кабели КВС-650, КВС-1000, КСВ ДСП-2100.

Водоохлаждаемые кабели обладают в сравнении с голыми большей нагрузочной способностью.



*a* – звезда на электродах; *б* – треугольник на шинтованном пакете;

*в* – несимметричный треугольник на электродах;

*з* – симметричный треугольник на электродах; *д* – триангулированная короткая сеть;

*1* – шинный мост; *2* – гибкая часть; *3* – трубошины; *4* – электроды; *5* – печной трансформатор.

Рисунок 4.10 - Схемы коротких сетей ДСП

На печах ёмкостью 80 и 100 т применяются водоохлаждаемые кабели с использованием голого кабеля МГЭ-500, помещенного в резинотканевый рукав диаметром 50мм, а на печах ёмкостью 200 т – с использованием кабеля МГЭ-1000, помещенного в рукав диаметром 65 мм.

В современных зарубежных ДСП средней и большой ёмкости гибкие токопроводы выполняются из водоохлаждаемых кабелей сечением 3000-6000 мм<sup>2</sup> в количестве не более четырех на гирлянду, по которой протекает линейный ток.

Токопроводы на рукавах электрододержателей выполняются из медных водоохлаждаемых труб (трубошин).

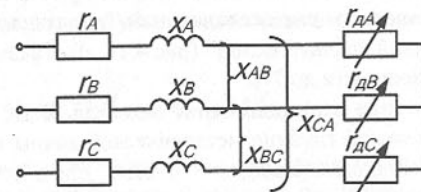


Рисунок 4.11 – Схема замещения трехфазной сети

Расположение вторичного токоподвода в одной плоскости приводит к неравенству взаимоиндуктивностей фаз и, как следствие, к неравномерности выделения мощности в электрических дугах. Это явление называют **переносом мощности**.

Значение активных мощностей при симметрии токов в фазах для трехфазной цепи, схема замещения которой показана на рис.4.11, находятся по формулам:

$$\begin{aligned} P_A &= \operatorname{Re}(U_A \cdot I_A^*) = I^2 \cdot (r_A + \sqrt{3} \cdot x_{AB}/2 - \sqrt{3} \cdot x_{CA}/2); \\ P_B &= \operatorname{Re}(U_B \cdot I_B^*) = I^2 \cdot (r_B + \sqrt{3} \cdot x_{AB}/2 - \sqrt{3} \cdot x_{BC}/2); \\ P_C &= \operatorname{Re}(U_C \cdot I_C^*) = I^2 \cdot (r_C - \sqrt{3} \cdot x_{BC}/2 + \sqrt{3} \cdot x_{CA}/2). \end{aligned} \quad (4.9)$$

При неравенстве взаимоиндуктивных сопротивлений  $x_{AB} \neq x_{BC} \neq x_{CA}$  у печей с асимметричной короткой сетью активные мощности в фазах различны. В дуговых печах с короткой сетью, симметричной относительно средней фазы, крайняя (опережающая) фаза имеет наибольшую мощность и называется "дикой". Другая крайняя (отстающая) фаза имеет наименьшую мощность и называется "мертвой". В печах с общей асимметрией перенос мощности осуществляется между всеми фазами, и "дикой" или "мертвой" фазой может быть любая.

Несмотря на то, что суммарная активная мощность печи при наличии переноса мощности между фазами и остается неизменной, перенос мощности отрицательно влияет на технико-экономические показатели работы печи. Некоторое повышение производительности "дикой" фазы не компенсирует снижение производительности "мертвой" фазы. Кроме того, усиливается износ футеровки вблизи дуги "дикой" фазы и возрастает расход электродов в ней. Чем больше мощность печи, тем больше неравенство мощностей дуг. Для мощных печей оно может составить  $P_{ДА} = (0,5 - 0,7)P_{ДВ}$ ;  $P_{ДС} = (1,5 - 1,3)P_{ДВ}$ , что вызывает крупные эксплуатационные неудобства.

Основной способ уменьшения явления переноса мощности – выполнение симметричной короткую сеть. В некоторых пределах выровнять мощности можно с помощью устройств, изменяющих взаимоиндуктивность фаз.

Некоторые американские и японские фирмы для выравнивания мощности по фазам применяют максимальную триангуляцию проводников в пространстве, т.е. расположение их по вершинам пространственного треугольника (асимметрия мощности составляет 3-4 %). Английские фирмы применяют для симметрирования вторичного токоподвода схему соединений "треугольник на подвижных башмаках с перекрещенной средней фазой" (рис.4.10, д). Такая схема позволяет снизить несимметрию мощности до 7%.

**Электромагнитное перемешивание металла.** В ДСП средней и большой ёмкости при значительной глубине металлической ванны имеет место заметный перепад температуры по высоте жидкого металла. Для обеспечения интенсивного протекания химических реакций металла со шлаком, необходимо обеспечивать перемешивание жидкого металла. На печах малой ёмкости это осуществляется ручным способом гребками, а на печах ёмкостью 25т и выше – с помощью элек-

тромагнитного поля. В основу электромагнитного перемешивания металла положен принцип, аналогичный принципу работы короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Бегущее магнитное поле, создаваемое расположенным под днищем печи статором переменного тока  $I_2$  с двумя обмотками, токи в которых сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , вызывает механические усилия в жидком металле ванны в направлении продольной оси печи.

Приводимые в движение нижние слои жидкого металла доходят до конической поверхности футеровки ванны и вызывают движение верхних слоев в обратном направлении. За счет переключения обмоток статора возможно изменение направления движения металла.

Для электромагнитного перемешивания используют ток величиной до 2500 А напряжением от 100 до 300 В.

Глубина проникновения электромагнитного поля в жидкий металл зависит от частоты тока в обмотках статора. Для ДСП ёмкостью 25-100 т частота тока в статоре перемешивающего устройства обычно принимается в пределах 0,5-1,5 Гц, причем меньшая частота соответствует большей ёмкости печи.

Промышленные установки электромагнитного перемешивания состоят из трех компонентов: индуктора, источника питания и системы охлаждения.

В качестве источников питания статоров используют электромагнитные преобразовательные агрегаты и тиристорные преобразователи частоты. Охлаждение статора производится водой, если он изготовлен из медной трубки, или воздухом, по специальным каналам внутри обмотки. Стоимость установки для электромагнитного перемешивания металла составляет 30-100% стоимости печи, а расход энергии в ней на 1 т выплавленной стали всего лишь 3-5% полного расхода энергии.

**Автоматизация дуговых электропечей.** Все промышленные ДСП оборудуют автоматическими регуляторами мощности. Применение регуляторов позволяет сократить продолжительность плавки, повысить производительность печи, снизить удельный расход электроэнергии, уменьшить науглероживание металла и повысить его качество, уменьшить колебание мощности при плавке, улучшить условия труда и т.д.

Поскольку основной задачей регулятора электрического режима является поддержание заданной активной мощности дуги, то принципиально возможно строить регуляторы, поддерживающие постоянным один из следующих параметров: величину тока дуги  $I_D$ ; напряжение дуги  $U_D$ ; отношение напряжения к току дуги или её сопротивление  $Z_D = U_D / I_D$ , а также активную мощность дуги  $P_D$ .

Наилучшим параметром регулирования оказалась разность сигналов тока и напряжения дуги.

$$a \cdot I_D - b \cdot U_D = c \cdot I_D \cdot \Delta Z_D, \quad (4.10)$$

где  $a$  и  $b$  - постоянные коэффициенты, зависящие от коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения и регулировочных сопротивлений (величины  $a$  и  $b$  изменяют вручную при настройке);

$\Delta Z_D$  - отклонение полного сопротивления фазы  $Z_D$  от заданного значения  $Z_3 = a/\epsilon$ .

Использование для регулирования параметра  $\Delta Z_D$  позволяет легко зажигать дугу, поддерживать на заданном уровне мощность, выделяемую в ванне печи, свести к минимуму взаимное влияние фаз и влияние колебаний питающего напряжения. Регулятор, параметрами регулирования которого является разность сигналов тока и напряжения дуги, называется *дифференциальным*.

К регуляторам мощности ДСП предъявляются следующие требования:

1) достаточная чувствительность, необходимая для обеспечения заданного режима работы печи. Зона нечувствительности регулятора должна быть не более  $\pm(3\div 6)\%$  в период расплавления и  $\pm(2\div 4)\%$  в остальные периоды плавки;

2) быстродействие, обеспечивающее устранение короткого замыкания или обрыва дуги в течение 1,5-3 с. Обеспечение такого быстродействия возможно лишь при достаточной скорости перемещения электродов. Лучшие современные регуляторы обеспечивают скорость перемещения электродов в период расплавления до 2,5-4 м/мин (при электромеханическом приводе) и до 5 м/мин (при гидравлическом приводе);

3) сведение к минимуму ненужных перемещений электродов при несимметричных изменениях режима, а также при кратковременных (доли секунды) нарушениях режима;

4) возможность достаточно плавного изменения задаваемой мощности печи в пределах 20-125% номинальной с точностью не менее 5%;

5) возможность быстрого и легкого перехода с автоматического регулирования на ручное и наоборот;

6) автоматическое зажигание дуг в начале плавки и после их обрыва или короткого замыкания (в последнем случае желательно не допускать обрыва дуг);

7) остановка всех электродов печи при исчезновении питающего напряжения;

8) надежность и простота обслуживания.

Функциональная схема, общая для всех промышленных регуляторов ДСП, приведена на рис. 4.12. Сигналы от датчиков тока *ДТ* и напряжения *ДН* поступают на блок сравнения *БСР*, куда подается также сигнал от блока задания *БЗ*. Сигнал рассогласования с выхода *БСР* поступает на вход блока регулирования *БР*, в котором производится предварительные усиления сигнала, формируется статическая характеристика (зона нечувствительности, зона пропорциональности, коэффициент усиления). На вход *БР* поступает, также сигнал от блока обратной связи *БОС*, обеспечивающий формирование заданного переходного процесса, стабилизацию системы автоматического регулирования. Сигнал с выхода *БР* усиливается силовым усилителем *БСУ* и подается на исполнительный механизм *ИМ* перемещения электрода. При отклонении электрического режима ДСП от заданного электрод перемещается в направлении, соответствующем ликвидации рассогласования.

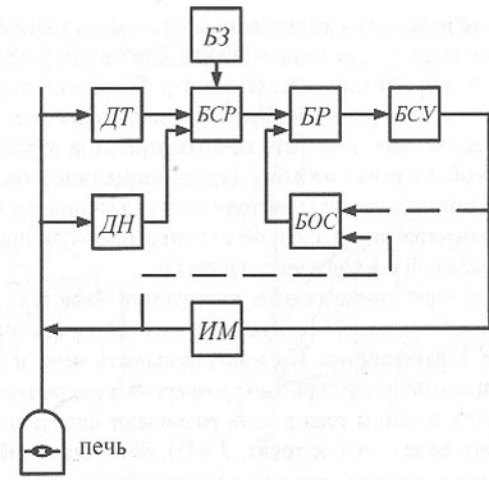


Рисунок 4.12 – Блок-схема регулятора ДСП

Регуляторы мощности ДСП различаются в первую очередь примененными в них средствами автоматизации и типом привода перемещения электрода. В качестве усилителя используются электромашинные, электронные, ионные, магнитные, тиристорные, гидравлические усилители, электромагнитные муфты и др.

Более высокую надежность и лучшую статическую характеристику имеют регуляторы с магнитным усилителем типов РБС, РБР, МТР, АРДМ-М. Однако в наибольшей степени перечисленным требованиям отвечает тиристорный регулятор АРДМТ.

Регулятор АРДМТ выпускается в трёх исполнениях, которые отличаются мощностью двигателя, аппаратурой его включения и защиты. Эти исполнения могут применяться на печах ёмкостью от 0,5 до 100т. Печь ДСП-200 укомплектована регулятором АРДМТ-12 (12-мощность двигателя в кВт).

Печи ДСП-6, ДСП-12, ДСП-25 и ДСП-50 с гидравлическими приводами перемещения электродов поставляются с электрогидравлическими регуляторами мощности типа АРДГ.

В настоящее время внедрены системы комплексной автоматизации работы дуговой печи с использованием программно-управляющих устройств. Эти системы обеспечивают минимальную продолжительность плавки, оптимальное значение питающего напряжения для получения самого низкого расхода энергии на выплавку 1т металла, рациональное распределение энергии между фазами- электродами печи, управление компенсацией реактивной мощности, поддержание температуры и химического состава металла в заданных пределах.

Регуляторы снабжаются датчиками контролируемых величин, усилителями сигналов информации, исполнительными устройствами и приводами.

Перспективным направлением автоматизации ДСП является создание АСУ цеха дуговых печей и предприятия в целом.

#### 4.2.3 Рабочие режимы и характеристики электродуговых печей.

Дуговая сталеплавильная печь работает, как правило, круглосуточно с остановками на ремонт и профилактический осмотр. Цикличность работы определяется чередованием плавки с отключением печи для слива металла, заправки и загрузки. Большая единичная мощность печных агрегатов определяет большие расходы электрической энергии, поэтому перед энергетической службой промышленных предприятий и технологами стоят задачи выбора рационального режима работы печи, обеспечивающего, с одной стороны, высокую производительность, а с другой – минимальный расход электроэнергии.

Поскольку лучшие значения этих показателей зачастую не совпадают, установление оптимальных условий эксплуатации дуговой печи основывается на анализе энергетических характеристик. Производительность печи и расход электроэнергии зависят от мощности дуг, потерь электроэнергии и связаны с рабочим током.

В зависимости от силы тока в печи различают следующие режимы работы: а) режим холостого хода (дуги не горят,  $I = 0$ ); б) нормальный режим ( $I = I_H$ ); в) режим эксплуатационного короткого замыкания ( $I = I_K$ ).

Наиболее полную картину изменения энергетических параметров установки с изменением режима работы печи можно получить при рассмотрении электрических и рабочих характеристик.

**Электрические характеристики.** Режим работы ДСП в пределах выбранной ступени напряжения трансформатора регулируется в основном по току. Зависимость электрических параметров режима подведенной  $P$  и полезной  $P_n$  мощности, коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$ , от тока  $I_2$  называют электрическими характеристиками печи. Для выбора рационального режима работы печи необходимо знать электрические характеристики на каждой ступени напряжения трансформатора; их можно построить по данным аналитического и графического расчета.

*Построение электрических характеристик аналитическим расчетом.*

При упрощенном расчете принимают следующие допущения: напряжение питающей сети симметрично и неизменно (печь питается от системы бесконечно большой мощности); сопротивления активные и реактивные во всех фазах одинаковы и не зависят от силы тока; токи и напряжения дуг синусоидальны и совпадают по фазе; токи во всех фазах равны; потери в стали и ток намагничивания трансформатора не учитываются. Эти допущения позволяют применить для симметричных цепей простые методы расчета, а также круговые диаграммы. Расчеты цепей дуговых установок ведут для одной фазы симметричной цепи.

Поскольку напряжение на дуге не зависит от силы тока, то сопротивление дуги при постоянной длине дуги ( $I_d = const$ ;  $U_d = const$ ) обратно пропорционально силе тока дуги:  $r_d = U_d / I_d = const$ .

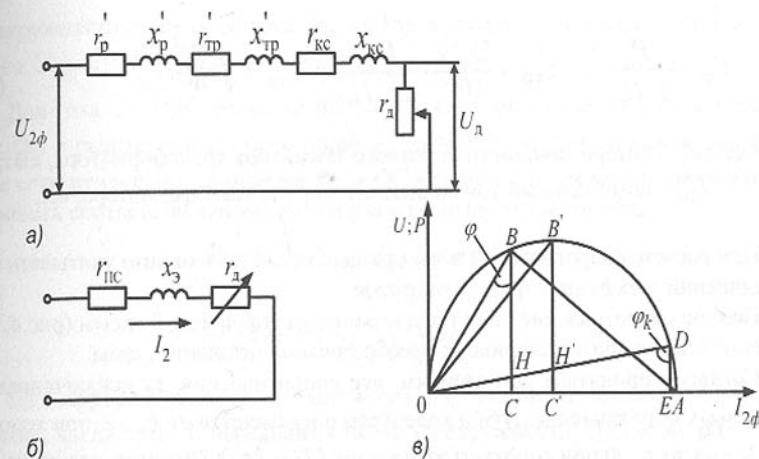


Рисунок 4.13 – Схемы замещения (а, б) и круговая диаграмма (в)

Эквивалентное активное, индуктивное и полное сопротивления, приведенные к напряжению  $U_2$  трансформатора, по схеме замещения (рис. 4.13 а, б) соответственно:

$$r_3 = r'_{pc} + r'_d = r'_{tr} + r_{kc} + r'_d; \quad (4.11)$$

$$x_3 = x'_p + x'_{tr} + x_{kc}; \quad (4.12)$$

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2}. \quad (4.13)$$

Активное сопротивление обмоток реактора невелико и в предварительных расчетах можно не учитывать.

Сопротивление короткой сети  $r_{kc}$  и  $x_{kc}$  определяют расчетом, измерениями на действующей печи или на модели.

Сопротивление реактора  $x'_p$ , приведенное к стороне низшего напряжения  $U_2$  трансформатора:

$$x'_p = x_p \cdot (U_2 / U_1)^2, \quad (4.14)$$

где  $x_p$  – индуктивное сопротивление одной фазы реактора, Ом.

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора, приведенные к напряжению  $U_2$  трансформатора:

$$r'_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{3 \cdot I_{2\text{н}}^2}; \quad z'_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}}\%}{100} \cdot \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{н}}}; \quad x'_{\text{тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}'^2 - r_{\text{тр}}'^2}, \quad (4.15)$$

где  $\Delta P_{\text{к}}$  - потери мощности короткого замыкания трансформатора, кВт;

$I_{2\text{н}}$  - номинальный ток на низшей стороне трансформатора, кА.

При расчете сопротивлений в трехфазных цепях необходимо учитывать группы соединений трехфазных трансформаторов.

Полное сопротивление цепи определяется из упрощенной схемы (рис.4.13,б), полученной после соответствующих преобразований исходной схемы.

Согласно принятым допущениям, все сопротивления, за исключением  $r_{\text{д}}$ , постоянны. Сопротивление дуги в ходе плавки изменяется от  $r_{\text{д}} = \infty$  при холостом ходе ( $I_2 = 0$ ) до  $r_{\text{д}} = 0$  при коротком замыкании ( $I_2 = I_{2\text{к}}$ ). При этом величина тока

$$I_{2\text{к}} = U_{2\text{ф}} / \sqrt{r_3^2 + x_3^2} \approx U_{2\text{ф}} / x_3 \quad (4.16)$$

так как  $r_{\text{пс}} \ll x_3$ .

Для построения электрических характеристик задаются пятью-семью значениями тока  $I_2$  в промежутке от нуля до  $I_{2\text{к}}$ . Для выбранных значений  $I_2$  необходимые зависимости можно определить из следующих выражений:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - (x_3 / U_{2\text{ф}})^2 \cdot I_2^2}; \quad P = U_{2\text{ф}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi; \quad \Delta P_3 = I_2^2 \cdot r_{\text{пс}}; \quad (4.17)$$

$$P_{\text{п}} = P - \Delta P_3 = U_{2\text{ф}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi - I_2^2 \cdot r_{\text{пс}}; \quad \eta_3 = P_{\text{п}} / P.$$

Построение электрических характеристик с помощью круговой диаграммы. Запишем уравнение фазного напряжения  $U_{2\text{ф}}$

$$U_{2\text{ф}} = \dot{I}_2 \cdot r_3 + j \dot{I}_2 \cdot x_3. \quad (4.18)$$

Разделив уравнение на  $jx_3$ , получим

$$-j(U_{2\text{ф}} / x_3) = -jI_2(r_3 / x_3) + I_2. \quad (4.19)$$

Левая часть выражения (4.19) – вектор неизменной величины, отстающий от вектора  $U_{2\text{ф}}$  на  $90^\circ$ .

В правой части представлена сумма двух векторов, сдвинутых один относительно другого на  $90^\circ$ . Так как геометрическая сумма их неизменна, то графически их можно представить в виде прямоугольного треугольника, вписанного в полуокружность диаметром  $U_{2\text{ф}} / x_3$  (рис. 4.13,в). Вершина вектора  $I_2$  скользит по

полуокружности от нуля до тока  $I_{2\text{к}}$  (4.16), а угол сдвига  $\varphi$  между ним и напряжением  $U_{2\text{ф}}$  изменяется от нуля до  $\varphi_{\text{к}}$ .

Для тока  $I_2 = OB$  значение  $BC$  равно активной слагающей  $I_2 \cdot \cos \varphi$ , а отрезок  $OC$  – реактивной составляющей  $I_2 \cdot \sin \varphi$ . Поскольку принято, что напряжение сети неизменно, то отрезки  $BC$  и  $OC$  в определенном масштабе можно рассматривать соответственно как активную и реактивную мощность:

$$P = BC = U_{2\text{ф}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi; \quad (4.20)$$

$$Q = OC = U_{2\text{ф}} \cdot I_2 \cdot \sin \varphi. \quad (4.21)$$

Из построения следует, что максимум  $B'C'$  активной мощности достигается в момент, когда точка  $C$  переходит в центр  $C'$  окружности. При этом  $B'C' = OC'$ ;  $\cos \varphi = 0,707$ ;  $P_{\text{м}} = U_{2\text{ф}} \cdot I_{2\text{ф}} \cdot \cos \varphi = U_{2\text{ф}}^2 / 2 \cdot x_3$ . При коротком замыкании ( $I_{2\text{к}} = OD$ ) вся активная мощность выделяется в сопротивлении  $r_{\text{пс}}$ . Таким образом, отрезок  $DE$  представляет собой мощность потерь  $\Delta P_3 = DE$ . В промежуточных режимах от  $I_2 = 0$  до  $I_2 = I_{2\text{к}}$  активная мощность равна сумме полезной  $P_{\text{п}}$  и мощности потерь  $\Delta P_3$ :

$$P = BC = BH + HC = P_{\text{п}} + \Delta P_3. \quad (4.22)$$

Масштабы тока и мощности определяются из соотношений:

$$m_1 = U_{2\text{ф}} / (x_3 \cdot OA); \quad (4.23)$$

$$m_p = U_{2\text{ф}}^2 / (2x_3 \cdot B'C').$$

Задаваясь значениями тока  $I_2 = OB$  определяют на диаграмме отрезки  $BH$  и  $HC$  и соответствующие им значения  $P = BC$ ;  $P_{\text{п}} = BH$ ;  $\Delta P_3 = HC$ , откуда

$$\eta = BH / BC; \quad \cos \varphi = BC / OB. \quad (4.24)$$

Недостатком расчета по диаграмме является малая точность при величинах тока, соответствующих номинальному режиму работы печи. Анализ кривых, приведенных в нижней части рис.4.14 приводит к следующим выводам.

С увеличением тока полезная мощность растет лишь до определенного значения, а затем, пройдя максимум, начинает уменьшаться. Потери, пропорциональные квадрату величины тока, непрерывно возрастают, КПД снижается.

**Рабочие характеристики ДСП.** Для правильного выбора режима работы ДСП электрических характеристик недостаточно, поскольку дуговая печь как технологический агрегат характеризуется прежде всего удельным расходом электроэнергии и производительностью.



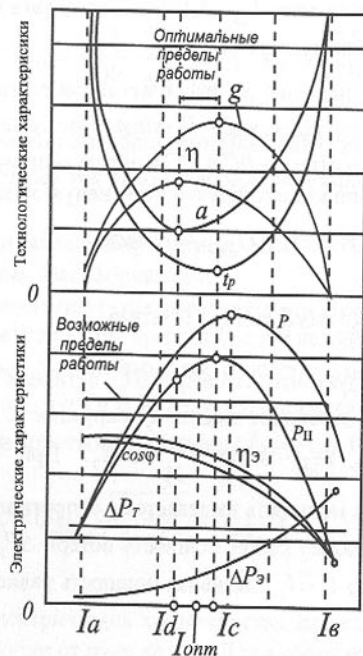


Рисунок 4.14 – Рабочие характеристики ДСП

Поэтому выбор рационального режима ведут по рабочим характеристикам, представляющим собой совмещенные электрические и технологические характеристики (рис.4.14). В нижней части рис.4.14 приведены электрические характеристики и независимые от тока (в первом приближении) тепловые потери печи  $\Delta P_T$ , в верхней – технологические: удельный расход электроэнергии  $a$ , кВт·ч/т; часовая производительность печи  $g$ , т/ч; время расплавления 1т стали  $t_p$ , т/ч и полный КПД  $\eta$ .

Анализ рабочих характеристик показывает:

1) возможные пределы режимов работы печи уже, чем электрические; очевидно, печь может работать лишь тогда, когда её активная мощность  $P$  не меньше, чем сумма её тепловых и электрических потерь ( $P \geq \Delta P_T + \Delta P_{\text{э}}$ ), что соответствует токам  $I_a$  и  $I_b$  на рис. 4.14;

2) кривая удельного расхода электроэнергии  $a$  имеет минимум при токе  $I_d$ , которому соответствует и максимальное значение полного КПД печи  $\eta$ ; следовательно, ток  $I_d$  определяет оптимальный энергетический режим;

3) кривая производительности печи  $g$  достигает максимума при токе  $I_c$ , который соответствует максимуму мощности дуг ( $P_{\text{II}}$ ). Этому же току соответствует наименьшее удельное время расплавления  $t_p$ ; следовательно, ток  $I_c$  определяет режим максимальной производительности;

4) оптимальный энергетический режим и режим максимальной производительности не совпадают.

Итак, если предприятие работает в условиях дефицита электроэнергии, то решающим фактором является оптимальный энергетический режим, характеризуемый током  $I_d$ . Если же главная задача состоит в том, чтобы выплавлять максимум металла, то определяющим является режим максимальной производительности  $I_c$ .

Значение тока  $I_{\text{опт}}$ , при котором себестоимость расплавления металла минимальна, лежит между значениями токов  $I_d$  и  $I_c$ .

Таким образом, рабочие характеристики ДСП позволяют проанализировать её работу, определить оптимальный режим и сделать выводы о правильности эксплуатации применяемого для её питания электрического оборудования.

#### 4.2.4 Дуговые сталеплавильные печи в системе электроснабжения.

Как потребители электрической энергии ДСП имеют следующие особенности:

1) большая единичная мощность 0,4-80 МВ·А, при значительной её реактивной составляющей (коэффициенты мощности изменяются от 0,88-0,89 (ДСП-5) до 0,7 (ДСП-200);

2) по надежности электроснабжения ДСП относятся к потребителям второй категории. Вследствие большой инерционности теплового процесса допускается перерыв электроснабжения на время ручного ввода резервного питания, поэтому систему АВР не предусматривают. Однако, некоторые потребители печей относятся к потребителям первой категории (двигатели наклона печи, двигатели насосов охлаждающей воды и др.);

3) график электрической нагрузки непрерывно циклический. Цикличность характеризуется чередованием плавков с отключениями печи для слива жидкого металла, заправки печи, завалки шихты, а также для выполнения других технологических операций;

4) в период расплавления работа печи характеризуется значительными толчками тока, пиками мощности, особенно реактивной. Колебания реактивной мощности достигают 200 % со скоростью до 500 Мвар/с и значительно превышают колебания активной мощности;

5) дуговая печь имеет определенную несимметрию (до 10 %) из-за несимметрии короткой сети (явление "мертвой" и "дикий" фазы), а также особенностей протекания процессов плавки;

6) нелинейность тока и напряжения в электрической дуге обуславливает явление высших гармоник.

Колебание токов дуг, несинусоидальность и несимметрия создают следующие помехи в системе электроснабжения: отклонения и колебания напряжения; несимметрию токов по фазам и несимметрию линейных напряжений; несинусоидальность формы кривой напряжения, высшие гармоники напряжений и токов на стороне высшего напряжения. Эти помехи вызывают: мигания ламп освещения; нарушение нормальной работы автоматики, контрольно-измерительных приборов; ухудшение работы телевизионных установок; нарушение нормальной работы приводов технологического оборудования (влияние на работу их электродвигате-

лей); нарушение нормальной работы поисковой, громкоговорящей и диспетчерской связи; вибрацию шин РУ.

Для снижения вредного влияния работы ДСП на систему электроснабжения применяют организационно-технические мероприятия технологического и электроэнергетического характера.

К *технологическим мероприятиям* следует отнести: тщательную сортировку и подготовку шихты, равномерную её загрузку, использование качественных электродов, выбор рационального режима работы печи, применение быстродействующих регуляторов и т.д.

К *электроэнергетическим мероприятиям* относятся: автоматическое регулирование тока, уменьшение колебаний напряжения по фазам, фильтрация высших гармоник, применение специальных устройств (продольной ёмкостной компенсации, трансформатора с расщепленными обмотками, сдвоенного реактора, синхронных компенсаторов), схемные мероприятия (применение повышенного напряжения для питания ДСП; применение глубоких вводов; перенос узла подключения ДСП в точку с большей мощностью короткого замыкания).

Применяемые схемные решения для питания индивидуальных ДСП и цехов должны предусматривать связь с другими потребителями лишь на напряжении 110-220 кВ.

**Техника безопасности при работе на дуговых печах.** Основную опасность при эксплуатации ДСП представляет собой, как у всякого высоковольтного оборудования, возможность поражения персонала током. Поэтому необходимо, чтобы при проектировании установки были выполнены все требования "Правил устройства электроустановок", а в эксплуатации удовлетворялись требования "Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей".

Однако, помимо высоковольтного оборудования, расположенного в отдельном помещении, снабженном блокировкой, электрооборудование на стороне низкого напряжения также является опасным, так как у большинства мощных современных печей фазное напряжение относительно земли может достигать 500В, а в случае заземления одной из фаз – 850В. Между тем короткая сеть печи имеет неогражденные участки, в первую очередь электроды, электрододержатели и трубы токовода на стойках. С этими участками возможно соприкосновение персонала при перепуске электродов и уплотнения электродных отверстий в своде печи. Поэтому корпус печи и все ее механизмы и электроды должны быть надежно заземлены, а операции скачивания шлака, перепуска электродов и взятия пробы должны проводиться при отключенной печи.

Помимо поражения током обслуживающий ДСП персонал может подвергаться ожогам. Для предохранения его от ожогов, необходимо, чтобы спецодежда, особенно рукавицы, была в порядке; брюки должны быть навыпуск, чтобы мельчайшие брызги расплавленного металла и шлака не могли попасть между голенищем сапога и брюками. Глаза должны быть защищены как от ожога, так и от ослепляющего действия дуг темными очками.

#### Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются дуговые печи?
2. Из каких основных элементов состоят дуговые печи прямого действия?
3. На какие основные периоды делятся циклы плавки печи?
4. Какие составляющие входят в упрощенный энергетический баланс ДСП?
5. Какие отличия имеют печные трансформаторы от обычных?
6. Какие выключатели применяются для подключения ДСП?
7. Какие требования предъявляются к короткой сети ДСП?

8. Какие существуют схемы соединения короткой сети?
9. В чем состоит явление переноса мощности в ДСП?
10. Как осуществляется электромагнитное перемешивание металла?
11. Какая физическая величина используется в качестве параметра регулирования режима работы ДСП?
12. Какие требования предъявляются к регулятору мощности ДСП?
13. Какие элементы входят в функциональную схему регуляторов мощности ДСП?
14. Какое назначение электрических и рабочих характеристик ДСП?
15. Какие помехи вносит работа ДСП в электрическую сеть и какие мероприятия применяются для снижения этих помех?
16. Какие требования техники безопасности при работе на дуговых печах?

### 4.3 Руднотермические печи

**4.3.1 Назначение, классификация и конструктивное исполнение руднотермических печей.** Руднотермические печи (РТП) являются наиболее широким и сложным классом дуговых печей сопротивления, различающихся по назначению, особенностям технологического процесса, конструкциям, виду источника питания и т. д.

Они предназначены для получения ферросплавов (ферросилиция, ферромарганца, феррохрома, силикомарганца, силикохрома, ферровольфрама, ферромолибдена, феррованадия, сплавов циркония, феррониобия, ферробора, силикокальция и др.), продуктов цветной металлургии (штейнов меди, никеля, свинца, цинка), электрокорунда, плавящихся огнеупоров, продуктов химической промышленности (фосфора, карбида кальция) и некоторых специальных продуктов.

В РТП нагрев перерабатываемых материалов производится за счет теплоты, выделяющейся при протекании тока по электродам, шихте, электрической дуге и расплавленному материалу. Режим работы РТП относительно спокоен, дуги хорошо теплоизолированы и горят более устойчиво, чем в ДСП.

Номенклатура продуктов, получаемых в РТП, весьма широка: они могут выпускаться из печи в виде пара или газа, жидкости-расплава, твердого тела, извлекаемого целым слитком.

Все руднотермические печи можно разделить на *рудноплавильные* для расплавления руды или синтетических шлаков без проведения химических реакций: плавка муллита (футеровка стеклоплавильных печей), базальта, диабазы (каленое литье изделий для химических реакторов) и *рудновосстановительных* для плавления руды и восстановления одного или нескольких химических элементов из окислов руды.

Существуют два режима работы печей:

- 1) с *открытой дугой*; такие печи применяются для рафинировочных процессов (производство безуглеродистого феррохрома; металлического марганца и т.д.);
- 2) с *закрытой дугой*; в таких печах электроды опущены в шихту, дуги горят в шихте, причем токи замыкаются через дугу и электроды, а часть – непосредственно через шихту между электродами (печи смешанного нагрева). Эти печи используются для выплавки ферросилиция, силикомарганца и т.д.

Общими признаками РТП являются:

1) удельное электрическое сопротивление шихты сильно меняется при повышении температуры;

2) температура расплавления шихты составляет 1200-2200 К, что определяет высокие удельные расходы электроэнергии на выпуск единицы продукции и наличие мощного энергетического хозяйства;

3) непрерывный режим работы в течении 1-2 лет;

4) электрический режим работы относительно спокоен (в отличие от ДСП);

5) толчки тока и эксплуатационные короткие замыкания отсутствуют.

Конструктивно печи РТП можно разделить на:

1) печи с открытым колошником (*открытые*), печи перекрытые сводом (*полузакрытые*) и печи, закрытые герметичным сводом со специальными уплотняющими устройствами электродов (*герметичные печи*). Обычно два последних типа печей называют закрытыми;

2) печи с *круглой* в плане ванной (шахтой), с *прямоугольной* и редко *треугольной* в плане ванной; круглые ванны печей для некоторых процессов выполняют вращающимися с частотой 0,3-1 оборот в сутки и возможностью реверса. Ряд небольших рафинировочных печей имеют наклонную рафинировочную ванну, что позволяет разливать продукт в изложницы;

3) *одно-, трех- и шестиэлектродные* печи; одноэлектродные печи, являющиеся однофазной нагрузкой, применяются очень редко; появление шестиэлектродных прямоугольных печей связано с увеличением мощности печи и трудностями реализовать эти мощности тремя электродами; по тем же причинам в США появились проекты круглых шестиэлектродных печей.

В РТП применяются электроды трех видов: угольные, графитированные и самоспекающиеся. Последние называют также самообжигающимися или набивными.

Электродная промышленность выпускает для РТП *угольные* электроды диаметром до 1200-1400 мм и *графитированные* - до 800 мм. Эти электроды при наибольшем диаметре способны пропускать токи от 60 до 80 кА.

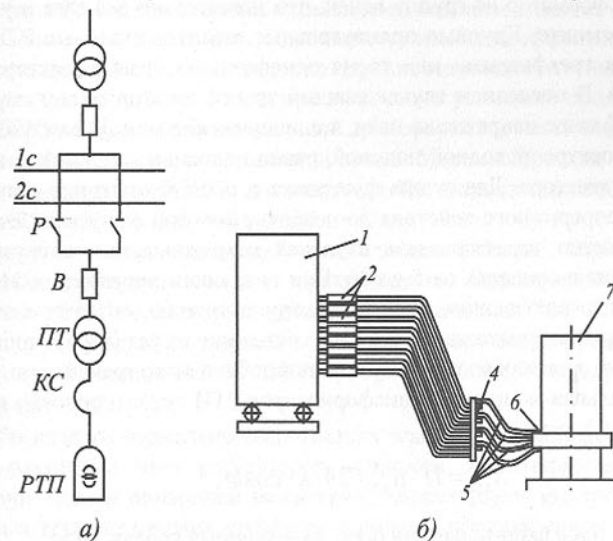
Токи же по электродам крупных РТП значительно выше, что затормозило развитие РТП из-за отсутствия электродов на большие токи. Выход был найден в создании *самоспекающихся* электродов. Будучи примерно в 4 раза дешевле угольных, такие электроды пока не имеют ограничений в размерах. Диаметры круглых самоспекающихся электродов достигают 2000 мм и выше, размеры поперечного сечения прямоугольных электродов - 3200x850 мм, длина электрода 10-15 м, а масса - 5 т. Электроды подвешивают с помощью стальных лент и цепей или тросов к лебедкам, установленным в верхней части здания. С помощью этих лебедок электроды поднимаются или опускаются, тем самым осуществляется регулирование токов фаз. Удельное электрическое сопротивление самоспекающихся электродов в 2-3 раза выше, чем у угольных, и в 50-100 раз выше, чем у графитированных. Сопротивление нагрузки РТП значительно ниже, чем у ДСП, поэтому вторичное напряжение печных трансформаторов ниже, а токи при тех же мощностях в 1,5-2 раза больше. Это приводит к тому, что короткая сеть РТП более мощная и сложная.

Так как токи фаз составляют несколько десятков тысяч ампер и достигают до 100000 А и даже больше, токоподводы выполняются, для уменьшения индук-

тивности, из перешихтованных шин (чередование прямых и обратных шин или чередование фазных шин) или охлажденных водой медных труб. Они состоят из трех частей (рис. 4.15,б) - перешихтованного участка 3 от выводов печного трансформатора 1 до неподвижных литых медных башмаков 4, в которых закреплена гибкая часть токоподвода - пакеты гибких кабелей или лент 5, обеспечивающих свободное перемещение электрододержателей относительно неподвижного токоподвода. Другой конец гибкой петли токоподвода зажат в подвижных башмаках 6, жестко связанных медными водоохлаждаемыми трубами с щеками электрододержателей электродов 7.

Промышленность выпускает руднотермические печи типа РКО, РКЗ и РПЗ, в которых приняты следующие обозначения: первая буква «Р» - руднотермическая; вторая - «К» или «П» - с круглой или прямоугольной ванной; третья - «О» или «З» - открытая или закрытая. Далее идет цифра - мощность печи в МВА и буква - условное обозначение основного продукта, для получения которого предназначена печь: К - карбид кальция, Ф - фосфор и т.д. В конце обозначения иногда буквой и цифрой указывают завод-изготовитель и модификацию печи. Например, РПЗ-33Ш - печь руднотермическая, прямоугольная, закрытая, мощностью 33 МВА предназначенная для выплавки медного штейна.

**4.3.2 Электрооборудование руднотермических печей.** Питание РТП осуществляется через двойную систему распределительных шин понижающей подстанции через разъединители Р, заблокированные таким образом, что питание может производиться одновременно только от одной системы шин (рис. 4.15,а).



1 - трансформатор; 2 - гибкие компенсаторы; 3 - пакет трубчатых шин; 4 - неподвижный башмак; 5 - гибкие ленты; 6 - подвижный башмак; 7 - электроды

Рисунок 4.15 - Схема подключения (а) и схема короткой сети (б) руднотермической печи

Руднотермические печи работают на переменном токе. В состав электрооборудования РТП входят: печной трансформатор, высоковольтная арматура (разъединитель, высоковольтный выключатель), контрольно-измерительная аппаратура, регуляторы и т.п. Мощности действующих РТП лежат в пределах 5-80 МВА. Вновь разрабатываемые и проектируемые печи должны соответствовать принятому для РТП ряду мощностей: 16,5, 24, 33, 48, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250 МВА.

На рис. 4.15,б показана короткая сеть руднотермической печи РКЗ-48Ф. Охлаждение трубчатого пакета шин 3 производится водой протекающей внутри токоведущих труб. Конфигурация короткой сети выполнена так, чтобы проводники с противоположным направлением тока были расположены как можно ближе друг к другу. Это снижает величины реактивных сопротивлений и падений напряжений в короткой сети.

Руднотермические печи оборудуют одним трехфазным или тремя однофазными трансформаторами. Для печей малой мощности до 10,5 МВА используют трансформаторы и другое силовое оборудование, которые предназначены для установки ДСП малой или средней емкости.

РТП средней мощности (порядка 16-24 МВА) и большой мощности оборудуются специальными печными трансформаторами – трехфазными или комплектами однофазных типа ЭОЦН или ЭОЦП. Однофазные трансформаторы применяют только при очень больших мощностях печей (более 15МВА), что позволяет сократить размеры короткой сети, повысить  $\cos\phi$  и иметь один резервный однофазный трансформатор на группу печей, что значительно дешевле и удобнее при замене или ремонте. Крупные прямоугольные шестиэлектродные РТП комплектуются двумя трехфазными или тремя однофазными трансформаторами специальных типов. В последнем случае каждый трансформатор питает пару электродов, так что фазное напряжение печи, т.е. напряжение между электродами и раствором или электропроводной подиной, равно половине напряжения низкой стороны трансформатора. Для сушки футеровки и постепенного наращивания мощности РТП непрерывного действия до номинальной при её пусках печные трансформаторы имеют переключатели ступеней напряжения под нагрузкой. Число ступеней лежит в пределах от 5 до 46. При питающем напряжении 110 и 150 кВ применение переключающих устройств затруднительно, поэтому в этом случае используют трансформаторные агрегаты, состоящие из регулируемого и печного трансформаторов или из главного и вольтодобавочного трансформаторов.

Номинальная мощность трансформаторов РТП ориентировочно может быть определена по формуле:

$$S_{\text{тр}} = \Pi \cdot a_{\text{уд}} / 24 \cdot k \cdot \cos\phi, \quad (4.25)$$

где  $\Pi$  - производительность печи по заданному сплаву, т/сут;

$a_{\text{уд}}$  - удельный расход электроэнергии для данного процесса, кВт·ч/т;

$k$  - коэффициент, учитывающий простой печи, колебания первичного напряжения и мощности печи в ходе плавки, принимается  $k=0,88-0,9$ .

$\cos\phi$  - естественный коэффициент мощности печной установки, принимается 0,82-0,94.

Для улучшения коэффициента мощности и доведения его до приемлемого значения (0,9-0,95) применяются те или иные схемы компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов.

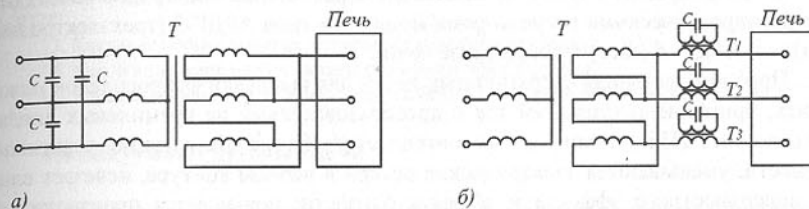


Рисунок 4.16 – Схемы поперечной (а) и продольной (б) компенсации реактивной мощности

При поперечно-емкостной компенсации (рис. 4.16,а) конденсаторы  $C$  включаются между фазами со стороны ВН, при этом реактивная энергия не поступает в сеть, а циркулирует в трансформаторе  $T$  и короткой сети, вызывая дополнительные потери. При продольно-емкостной компенсации (рис. 4.16,б) конденсаторы  $C$  включаются в разрез токопровода последовательно с дугами. Так как напряжение со стороны НН мало, то потребовалась бы очень большая емкость конденсаторов для компенсации, причем они были бы в значительной степени недоиспользованы. Включение конденсаторов осуществляется в специальные повышающие трансформаторы  $T1-T3$ , включенные в токопровод последовательно.

Продольно-емкостная компенсация является наиболее эффективной, так как позволяет одновременно с повышением коэффициента мощности симметризовать индуктивность фаз печи. Кроме того, при включении установки продольной компенсации (УПК) во вторичную цепь печной трансформатор частично разгружается от реактивной мощности, потребляемой печью. Удельный расход электроэнергии на печи, оборудованной УПК, снижается на 4%, а производительность увеличивается на 12%, чем при работе без УПК.

Рудновосстановительные и рудноплавильные процессы, характеризуются весьма высоким удельным расходом электроэнергии. При производстве ферросплавов удельный расход электроэнергии обычно составляет 3000-2000 кВт·ч/т, а при получении некоторых материалов – значительно больше, например, при производстве силикоалюминия 12000-13000, фосфора 13000-15000, карбида бора – 20000-22000 кВт·ч/т.

Для обеспечения нормального протекания технологических процессов в РТП применяют различные типы регуляторов мощности. Руднотермические печи с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов, предназначенные для технологических процессов с полным проплавлением шихты в дуговом режиме (например, РКО-3,5), комплектуются регуляторами мощности РДМ.

РТП с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов, предназначенные для рудновосстановительных процессов со спокойным режимом, комплектуются релейно-контакторными регуляторами мощности типа ПДВ. В последнее время вместо них применяются автоматические регуляторы

АРРЭ-3-02, выполненные на транзисторных элементах серии "логика" и магнитных усилителях.

РТП с гидравлическими механизмами перемещения электродов работают с электрогидравлическими регуляторами мощности типа АРДГ-3 (трехэлектродные печи) или АРДГ-6 (шестиэлектродные печи).

Проблему создания сверхмощных печей для выплавки ферросплавов можно решить, применив постоянный ток с преобразователями на кремниевых диодах. При питании РТП постоянным током отпадает проблема компенсации реактивной мощности, уменьшаются электрические потери в печном контуре, исчезает влияние поверхностного эффекта и эффекта близости; повышается производительность печи и т.п.

**Техника безопасности.** Основным требованием техники безопасности при работе на руднотермических печах является хорошее знание оборудования и процесса, соблюдение заданных параметров, режимов и порядка работы. Конструкция печи и электропечной установки должна отвечать требованиям "Правил устройства электроустановок", т.е. иметь набор необходимых защитных реле и блокировок, препятствующих выходу из строя оборудования и поражению персонала током. Особого внимания требует соблюдение правил техники безопасности при обеспечении надежной работы самоспекающихся электродов. Между электродами должны быть установлены деревянные щиты, препятствующие одновременному прикосновению к двум электродам.

Требуется периодическая проверка уровня изоляции токоведущих элементов от металлоконструкций цеха, которая должна составлять перед вводом печи в эксплуатацию не менее 0,5 кОм.

Не допускается загрузка шихты с повышенной влажностью в закрытую РТП.

В период проведения электросварочных работ на электроде и электрододержателе не допускается обслуживание электропечного трансформатора, поскольку даже при отключенном печном трансформаторе возможно поражение персонала на его выводах из-за эффекта обратной трансформации напряжения сварочной дуги. В остальном правила обслуживания трансформатора не отличаются от обычных правил.

Токоведущие части и все элементы электрической изоляции должны регулярно обдуваться сжатым воздухом во избежание коротких замыканий через токопроводящую пыль.

В цехах, где установлены РТП с открытым колошником, загазованность рабочих площадок выше, поэтому помимо мощной вытяжной вентиляции (вытяжной зонг над печью) устраивается приточная вентиляция.

Для снижения загрязнения окружающей среды в современных мощных герметизированных печах устраиваются газоотсосы, причем отсасываемые из печи газы охлаждаются и очищаются от пылевых частиц с помощью фильтров (матерчатых, мокрых, электрофильтров).

Очищенные газы, содержащие значительное количество окиси углерода, могут сжигаться в топках котлов для получения низкотемпературного пара, например для целей отопления.

#### Вопросы для самопроверки

1. Для чего предназначены РТП?
2. За счет чего производится нагрев перерабатываемых материалов в РТП?
3. На какие типы можно разделить все РТП?
4. Перечислите основные признаки РТП.
5. Какой режим работы имеет РТП?
6. Конструктивные особенности РТП.
7. Какие электроды применяются в РТП?
8. На какие токи рассчитаны токоподводы РТП и как они конструктивно выполняются?

9. Какие типы РТП выпускаются промышленностью?

10. Что входит в состав электрооборудования РТП?

11. Какие трансформаторы применяют в РТП?

12. Как ориентировочно может быть определена номинальная мощность трансформаторов РТП?

13. Какую величину имеет естественный коэффициент мощности?

14. Какой вид компенсации является наиболее эффективным?

15. Каковы основные требования техники безопасности при работе и обслуживании РТП?

#### 4.4 Вакуумные дуговые печи

**4.4.1 Назначение и конструктивное исполнение вакуумных дуговых печей.** Вакуумные дуговые печи (ВДП) служат для выплавки слитков и получения фасонного литья из высоколегированных сталей (нержавеющих, конструкционных, шарикоподшипниковых, электротехнических), жаропрочных сплавов, тугоплавких и химически активных металлов (титана, циркония, молибдена, ниобия, тантала, вольфрама).

Плавка в ВДП позволяет хорошо обезгазить металл – освободить от растворенных в нем азота, водорода, а также кислорода в виде СО и Н<sub>2</sub>О, удалить примеси, упругость пара которых выше, чем у основного металла, в результате чего металл не только очищается, но и приобретает более плотную структуру. Рабочее давление в камере печи может составлять 1,0-0,001 Па в зависимости от требований к получаемому металлу. С помощью современных ВДП получают слитки массой от нескольких сотен килограммов до 50-60 т.

Высокая концентрация энергии электрической дуги, отсутствие окисления и загрязнения расплава материалами футеровки и электродов – основные преимущества ВДП как плавильного агрегата. Плавка в ВДП обеспечивает получение высококачественных металлов и сплавов с заданными свойствами для новых видов техники, в том числе космической и атомной.

Однако, ВДП значительно сложнее и дороже других установок (например, электрошлакового переплава). Они работают лишь на постоянном токе, поэтому для их питания требуется специальный преобразователь. Кроме того, для создания вакуума необходима сложная и дорогостоящая вакуумная система.

Вакуумные дуговые печи могут работать с нерасходуемым и расходуемым электродом. В качестве материалов расходуемых электродов используется сам переплавляемый металл (титановые губки; штабики из вольфрама, молибдена, ниобия; стальной прокат или специальные стальные штанги). Материалом нерасходуемого электрода может служить вольфрам, графит или карбиды.

*ВДП с нерасходуемым электродом (рис. 4.17,а).* Электрод 6 с вольфрамовым наконечником 7 приварен к штоку 5, проходящему в камеру печи 4 через уплотнения 2 и имеющему подвод тока 1. Шток вращается, его конец описывает окружность в кристаллизаторе 10. Между ним и металлической ванной 8 кристаллизатора горит дуга. Откачная система поддерживает в камере печи и кристаллизаторе вакуум 0,1-0,001 Па. Сверху из бункера 3 питателем в камеру подается шихта, которая переплавляясь, образует в кристаллизаторе слиток 9. Источник питания подключен к штоку и кристаллизатору. Вместо вольфрамового электрода может быть исполь-

зован графитовый. И в том и другом случае металл слитка сильно загрязняется вольфрамом или углеродом. Поэтому такие печи применяются редко.

*ВДП с расходуемым электродом* (рис. 4.17, б). Расходуемый электрод 3, выплавленный в дуговой печи, закрепляется в электрододержателе 2 на конце штока 1. Из камеры печи 10 откачивают воздух. Электрод опускают до соприкосновения с лежащей на поддоне 7 заправкой 6, включают ток, электрод приподнимают, и между его концами и заправкой зажигается дуга. Электрод нагревается и постепенно начинает оплавляться. Металл каплями стекает на поддон (затравку) и, застывая, образует слиток 8 с расплавленной жидкометаллической ванной 4 наверху.

Так как в ВДП горит дуга и нет шлака, металл жидкой ванны сильно разбрызгивается; его капли, попадая на холодные стенки кристаллизатора 5, застывают на ней, образуя над уровнем ванны так называемую корону – слой пористого металла 9, который перед прокаткой слитка приходится обдирать на станке.

Вакуумные дуговые печи делятся на печи для плавки в кристаллизатор и для плавки в гарнисаже. Плавка металла в кристаллизатор может быть осуществлена по двум схемам: плавка в глухой кристаллизатор и плавка с вытягиванием слитка.

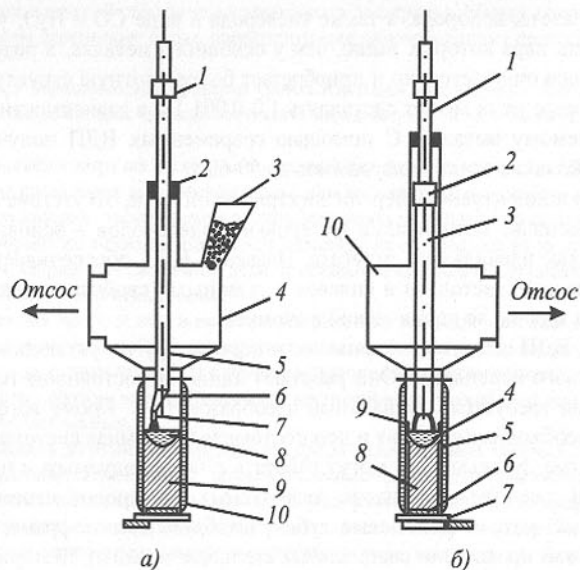
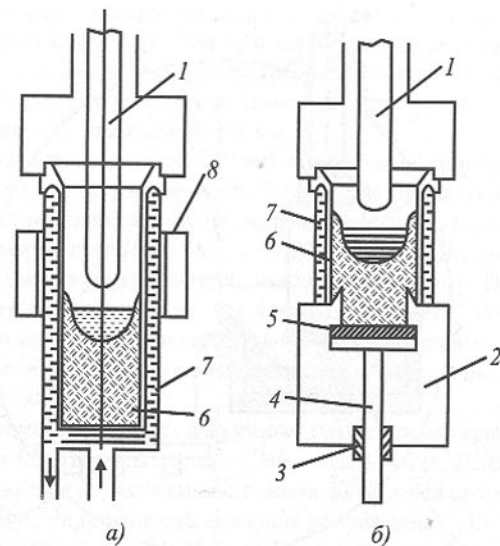


Рисунок 4.17 – Схема ВДП с нерасходуемым (а) и расходуемым (б) электродом

При плавке металла в *глухой кристаллизатор* (неподвижный поддон, рис. 4.18, а) зона расположения жидкой ванны перемещается от поддона (дна кристаллизатора) вверх. Поскольку длина наплавляемого слитка и соответственно кристаллизатора может составлять несколько метров, а зазор между кристаллизатором и электродом невелик, откачка выделяющихся при плавке газов затруднена, что отрицательно сказывается на качестве выплавляемого слитка.



1 – электрод; 2 – холодильник; 3 – вакуумное уплотнение штока; 4 – тянущий шток; 5 – поддон; 6 – слиток; 7 – кристаллизатор; 8 – соленоид

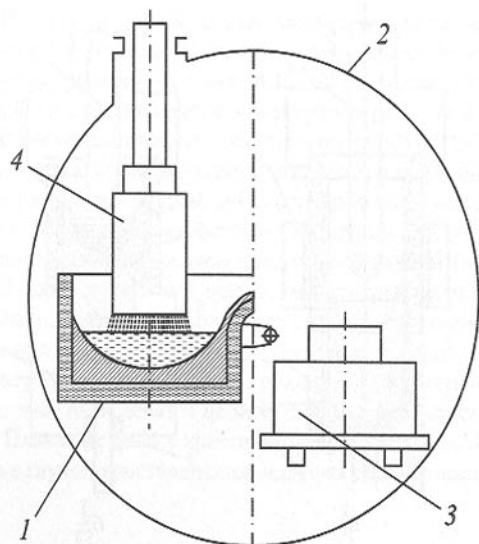
Рисунок 4.18 – Схема ВДП с глухим кристаллизатором (а) и с вытягиванием слитка (б)

При плавке в кристаллизатор с *вытягиванием слитка* подвижным поддоном, (рис. 4.18, б) зона расположения жидкой ванны находится в одном и том же положении, а слиток постепенно вытягивается вниз в расположенную под кристаллизатором холодильную камеру 2. В этом случае кристаллизатор имеет небольшую высоту, а условия обезгаживания металла в течение всего периода плавки остаются удовлетворительными. Конструкция ВДП с подвижным поддоном сложнее, чем печи с глухим неподвижным поддоном, так как требует применения механизма вытягивания, что усложняет выгрузку слитка.

В ВДП для плавки в гарнисаже (рис. 4.19) плавление металла производится в тигле. Поскольку температура стенок тигля ниже температуры плавления металла, на стенках образуется слой затвердевшего металла – гарнисаж, теплоизолирующий расплавленный металл и предотвращающий химическое взаимодействие металла с тиглем. В отличие от ВДП с кристаллизатором, в гарнисажных ВДП в течение плавки металл остаётся жидким и только после окончания расплавления сливается в форму (изложницу). Это достигается высокой удельной мощностью дуги и большой скоростью плавления.

В ВДП для плавки в гарнисаже широко применяются графитовые тигли, установленные в водоохлаждаемый кожух. Толщина стенки тигля 20-60 мм, а гарнисажа – 20-80 мм. Иногда применяются тигли из меди или хромистой бронзы.

Заливка форм в ВДП для плавки в гарнисаже может осуществляться при горячей дуге или после её разрыва.



1 – водоохлаждаемый тигель; 2 – кожух печи; 3 – изложница; 4 – электрод

Рисунок 4.19 – Схема ВДП для плавки в гарнисаже

**Основные элементы печи.** К ним относятся: рабочая камера, штوك-электрододержатель, расходоуемые электроды, кристаллизатор, поддон, соленоид.

**Рабочая камера** представляет собой водоохлаждаемую сварную конструкцию цилиндрической формы. В верхней части рабочей камеры установлены подсветы и смотровые окна, позволяющие наблюдать за горением дуги и наплавлением слитка. Для дистанционного наблюдения за ходом процесса к гляделкам пристраиваются специальные перископы, проектирующие изображение рабочей зоны на экран. К нижнему фланцу камеры прикреплен кристаллизатор.

**Шток-электрододержатель** служит для закрепления и перемещения расходоуемого электрода и подвода к нему тока. Он состоит из нескольких коаксиально расположенных труб, причем медная наружная труба является токоведущей. Внутренние стальные трубы обеспечивают механическую прочность конструкции штока. Между трубами имеются полости для прохода охлаждающей воды.

**Расходоуемые электроды** могут быть прикреплены к штоку различными способами. Они могут быть приварены к огарку, который крепят к хвостовику штока с помощью резьбы, могут удерживаться с помощью специального клиновидного или цангового зажима. Перемещение штока и расходоуемого электрода обеспечивается электрическим или гидравлическим приводом.

**Кристаллизатор** состоит из внутренней гильзы и наружного стального немагнитного кожуха. Между ними имеется полость для охлаждающей воды. Гильзу изготавливают из материала с хорошей теплопроводностью, не смачивающегося жидким металлом.

**Поддон** закрывает низ кристаллизатора, входит внутрь или примыкает к торцу его гильзы. Основа поддона – массивный медный диск, снабженный стальной рубашкой водяного охлаждения. Для предотвращения возможного прожога медного диска электрической дугой в начале плавки на него укладывают темплет из переплавляемого металла толщиной 50-100мм.

**Соленоид** устанавливают на боковой поверхности кристаллизатора. Он создает аксиальное с ним магнитное поле. Взаимодействие поля соленоида с током дуги и током, растекающимся в ванне расплавленного металла, приводит к повышению напряжения на дуге (для стали с 19-20,5 до 24-25 В), предотвращает переброски дуги на стенку кристаллизатора, стабилизируют дугу. При этом возникает вращение жидкого металла в ванне, что улучшает структуру переплавляемого металла. Питание соленоида производится от полупроводниковых выпрямителей, позволяющих при необходимости производить резкое увеличение и реверсирование тока намагничивания.

Промышленность выпускает вакуумные дуговые печи серий: ДСВ – для плавки стали в вакууме; ДТВ – для титана; ДНВ – для ниобия; ДДВ – для молибдена; ДТВГ – гарнисажные печи для титанового литья. КПД печей составляет 30-50%.

ВДП работают на сравнительно низких напряжениях (30-50 В при напряжении холостого хода источника 65-75 В), рабочие токи печей поэтому велики (12,5; 25; 37,5; 50 и даже 100кА).

**4.4.2 Электрооборудование и источники питания ВДП.** Плавка в ВДП производится в основном на постоянном токе, так как на переменном токе дуга вследствие усиленного охлаждения внутри холодного кристаллизатора горит неустойчиво (быстрое охлаждение дуги и её деионизация в момент перехода тока через нуль).

В ВДП применяется лишь прямая полярность, когда катодом является электрод, а анодом – жидкая ванна. Применение обратной полярности приводит к уменьшению производительности печи. Объясняется это тем, что у вакуумной дуги большая доля энергии выделяется у катода, где она больше всего и расходоуется на плавление металла.

Дуга в ВДП имеет слегка восходящую вольт – амперную характеристику и ей присущи относительно большое катодное падение напряжения (15-20 В), малое анодное падение напряжения (1-2 В) и малый градиент потенциала в столбе дуги (1,5-1,0 В/см).

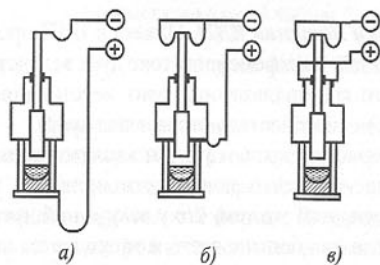
В ВДП дуга горит в пространстве, ограниченном поверхностью ванны и стенкой кристаллизатора, поэтому все эмитируемые электродом электроны попадают либо на ванну, либо на стенку. Электроны, попадающие на стенку, уносятся водой и расходоуются бесполезно, поэтому их количество надо свести к минимуму. Для этой цели нужно, чтобы зазор между электродом и стенкой кристаллизатора был больше длины дуги, следовательно, надо работать на коротких дугах. Но слишком короткая дуга приводит к пульсациям тока, так как через дугу проходят, падая в ванну, капли расплавленного металла электрода, вызывающие короткие замыкания при очень короткой дуге. Поэтому обычно работают на дугах длиной 30-50 мм.

При чрезмерном удлинении дугового промежутка, если длина дуги становится больше зазора между электродом и стенкой, дуга может перейти на стенку кри-

сталлизатора. Возникает аварийный так называемый *режим боковой дуги*. Если боковую дугу немедленно не погасить, она может прожечь стенку рабочей камеры или кристаллизатора, а попадание воды внутрь камеры может привести к взрыву установки. Погасить боковую дугу можно уменьшением длины дугового промежутка путем опускания электрода до короткого замыкания со слитком и затем вновь зажечь дугу.

**Элементы схемы электропитания ВДП.** В силовую цепь ВДП входят: источник питания, токопровод от источника питания до печи, состоящий из шин и гибких водоохлаждаемых кабелей, токоведущие части конструкции печи - токоведущий шток с электрододержателем, расходоуемый электрод, слиток, кристаллизатор, вакуумная камера.

Промышленные ВДП питаются от высоковольтных (6-10кВ) сетей предприятия по общепринятым схемам электроснабжения потребителей 1-й категории. Обычно применяется индивидуальное питание каждой ВДП от своего источника постоянного тока. Включение и отключение печи производят высоковольтным выключателем, в качестве которого используются электропечные модификации масляных и воздушных выключателей. На современных промышленных печах коммутирующая аппаратура в цепи постоянного тока не предусматривается.



*a* - асимметричный с анодом-поддоном;  
*б* - симметричный с анодом - нижним  
кольцом камеры;  
*в* - бифилярный

Рисунок 4.20 - Варианты токоподводов ВДП

При конструировании токоподводов особое внимание уделяется подводу тока к электроду и слитку. В первых промышленных конструкциях ВДП асимметричные контакты токоподводов (рис. 4.20, *a*) приводили к образованию несимметричных магнитных полей, вызывающих смещение дуги и появлению дефектов в слитке. В современных конструкциях ВДП используется симметричный токоподвод к штоку (катоду) и выравнивающему кольцу-фланцу между камерой и кристаллизатором (аноду) (рис. 4.20, *б*). Это позволило несколько снизить воздействие магнитного поля токоподвода на ванну металла. Однако полного устранения вращения ванны и ликвационных дефектов удастся добиться лишь при бифилярной схеме токоподвода к кристаллизатору через контакты вакуумной камеры (рис. 4.20, *в*).

**Источники питания ВДП.** Вакуумные дуговые печи очень чувствительны к изменениям режима. Для того чтобы колебания тока не влияли на качество слитка, они должны быть не более 3-5%. Между тем сама по себе ВДП достаточно устойчива, колебания тока в ней могут достигать 50-100% и даже более.

Источники питания ВДП должны иметь:

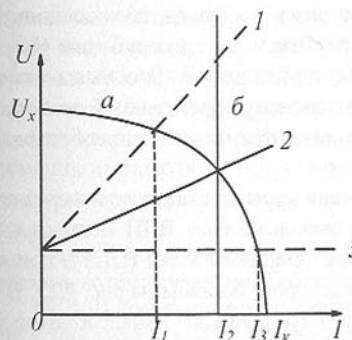
*a*) крутопадающие *a* или вертикальные *б* (рис.4.21) внешние характеристики, которые могут обеспечить необходимую тепловую мощность при горизонтальной или слабозрастающей ВАХ дуги, больших (десятки килоампер) токах и малом сопротивлении дуги;

*б*) широкий (1:8) диапазон регулирования мощности;

*в*) высокую стабильность поддержания мощности на заданном уровне (отклонения не более 2%);

*з*) особо высокую надежность, так как непредвиденное отключение печи ведет к потере выплавленного металла.

Так как ВДП работает на постоянном токе, источник питания для них должен включать преобразователь переменного тока в постоянный. В первых установках ВДП применялись машинные преобразователи серии ГПН 550 мощностью 645-675 кВт, рассчитанные на токи 6500 и 14000 А, с напряжением холостого хода 85 и 40 В. Однако их низкий КПД, большая инерционность, большие габариты и шум в работе, с одной стороны, и успехи в разработке полупроводниковых выпрямителей, с другой, заставили от них отказаться.



1, 2, 3 - вольт-амперные характеристики вакуумных дуг разной длины;  
 $U_x$  - напряжение холостого хода источника

Рисунок 4.21 - Сварочная (*a*) и вертикальная (*б*) характеристики источника питания ВДП

До 1972 г. промышленностью выпускались полупроводниковые источники питания ВДП на неуправляемых вентилях типов ВАКП и АВП. Они были выполнены по шестифазной схеме с уравнивающим реактором. Регулирование и стабилизация напряжения осуществлялись с точностью  $\pm 3\%$  комбинированным способом: грубое - с помощью переключения ступеней напряжения трансформатора, плавное (в пределах одной ступени) - управляемыми дросселями насыщения, устанавливаемыми в анодных цепях.

С начала 70-х годов ВДП комплектуются усовершенствованными серийными тиристорными источниками питания типа ТВ-9 (рис. 4.22). Их отличием от агрегатов ВАКП и АВП является применение управляемых вентиля-тиристоров с фазоимпульсной системой управления, что позволило увеличить КПД от 0,9 до 0,93 и повысить точность стабилизации тока ВДП до  $\pm 1\%$ .



Питание агрегатов марок ТВ-9-12500/75Т, ТВ-9-25000/75Т, ТВ9-37500/75Т, ТВ9-50000/75Т, ТВ-9-25000/115Т, ТВ-9-50000/115Т осуществляется на напряжении 6 или 10 кВ, первичная обмотка трансформатора имеет устройство РПН.

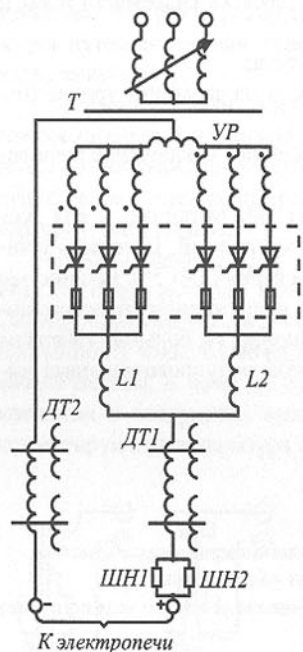


Рисунок 4.22 – Схема главных цепей тиристорного преобразовательного агрегата ТВ

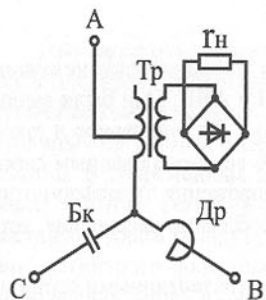


Рисунок 4.23 – Принципиальная электрическая схема силовых цепей однофазного параметрического источника тока

Вторичная обмотка состоит из групп двух обратных звезд с уравнительными реакторами УР. Каждая группа рассчитана на ток 12,5 кА (ТВ-9-12500/75Т). сглаживающие реакторы  $L_1$  и  $L_2$  предохраняют источник от резких бросков тока, возникающих при капельных коротких замыканиях. Номинальный ток (12,5-50кА) и вторичное напряжение (75-115 В) указаны в марке агрегата источника.

Шунты ШН1, ШН2 и датчики тока ДТ1 и ДТ2 (трансформаторы постоянного тока), а также измерители, основанные на эффекте Холла (для токов 37,5 и 50 кА), служат для измерения тока.

Недостатком источников типа ТВ-9 является низкий коэффициент мощности, составляющий в номинальном режиме 0,8, а при глубоком регулировании снижающийся до 0,6. Это вызывает необходимость компенсации реактивной мощности ВДП, которые питаются от таких преобразователей.

Для получения крутопадающих или вертикальных ВАХ источников питания ВДП используются параметрические источники тока (ПИТ), принципиальная схема которого показана на рис. 4.23. В состав однофазного ПИТ входит трансформатор нагрузки  $T_p$  в одном луче фазы А с регулятором напряжения под нагрузкой (РПН), включенный на группу неуправляемых вентилей, питающих постоянным током дуговую печь  $r_{II}$ . В луче фазы В включен дроссель  $D_p$ , имеющий обмотку подмагничивания для регулирования тока фазы. В фазе С включена конденсаторная батарея БК, емкость которой можно также регулировать. Основным условием регулирования является соблюдение соотношения  $x_L = x_C$ . В этом случае ток нагрузки не меняется с изменением её сопротивления, длины дуги, условий горения. Управляемый ПИТ отвечает всем требованиям, предъявляемым к источникам питания ВДП. Точность стабилизации тока в нем определяется добротностью реактивных элементов  $x_L$  и  $x_C$  и на серийных источниках составляет  $\pm 1\%$ .

При работе ПИТ возникает ряд особенностей. Одной из них является то, что режим холостого хода является для ПИТ ненормальным режимом, вызывающим значительное перенапряжение на реактивных элементах  $x_L$  и  $x_C$  ( $U_L = 1,25 \cdot U_d$ ;  $U_C = 2,05 \cdot U_d$ ), что необходимо учитывать при проектировании ПИТ и выборе электрооборудования.

Другой особенностью ПИТ является способность менять знак фазового угла нагрузки на противоположный. Это означает, что при индуктивном характере нагрузки ПИТ является генератором реактивной мощности и может служить для компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия. Серийные ПИТ имеют коэффициент мощности 0,9 (емкостной).

Система автоматического управления (САУ) ВДП должна осуществлять следующие операции: зажигание дуги без короткого замыкания, установление заданной длины дуги, подачу расходоуемого электрода со скоростью его оплавления, стабилизацию мощности дуги, быструю ликвидацию коротких замыканий, быстрое опускание электродов при перебросе дуги на стенку кристаллизатора и т.п.

В системах управления ВДП используются регуляторы типов АРДВП-3, АРДВ-Р2, АРДВ-Р2М и БУДП-10-1, применяемые с электромашинными, параметрическими и тиристорными источниками питания.

В настоящее время разработан универсальный регулятор ШЦД970Х на базе управляющего микропроцессора. В состав регулятора дополнительно входят устройство визуального отображения информации, ручного ввода-вывода информации, тиристорные преобразователи для питания соленоида и электродвигателей перемещения электрода. В программируемом постоянном запоминающем устройстве микропроцессора хранится программа, реализующая алгоритм управления переплавом.

**Техника безопасности при работе ВДП.** Безопасная работа ВДП достигается соблюдением ряда мер по обеспечению электробезопасности и предотвращению взрывоопасности печей.

На ВДП применяются низкие напряжения (в силовых цепях 40-60 В, в шкафах сигнализации и управления 12-220 В. Однако наличие металлических конструкций предъявляет повышенные требования к соблюдению правил техники электробезопасности – в первую очередь к надежному заземлению конструкций и корпусов шкафов, пультов и приборов, а также к использованию пониженных напряжений в оперативных цепях (12-36 В) и применению защитных средств (коврики, решетки и т.п.).

Большое внимание должно уделяться обеспечению взрывобезопасности печей, особенно при переплаве титана, тугоплавких и высокорекреакционных металлов. Взрыв может возникнуть как при нарушении работы систем водоохлаждения и попадании воды на расплавленный металл (при прожоге дугой кристаллизатора или поддона, механических повреждений систем и течи воды и т. д.), так и при попадании в печь горячих компонентов – пыли, расплавленной резины, вакуумного масла (при расплавлении уплотнительных прокладок, аварийной остановке вакуумных насосов и т.д.). Усугубляющим ситуацию фактором является затекание в печь воздуха, который способствует образованию взрывоопасных пыли-, углеводородно-, водородно- и пароводородно-воздушных смесей. Поэтому при проектировании печей и их эксплуатации необходимо предусматривать мероприятия по предотвращению аварийных ситуаций и последующих взрывов.

### Вопросы для самопроверки

1. Назначение вакуумных дуговых печей.
2. В чём преимущества и недостатки ВДП по сравнению с другими дуговыми печами?
3. На какие типы делятся ВДП?
4. Назовите основные элементы печи.
5. При каких значениях напряжений и токов работают ВДП?
6. На каком роде тока работают ВДП?
7. Какой вид имеет ВАХ в ВДП?
8. При какой длине дуги необходимо работать в ВДП?
9. Что собой представляет режим боковой дуги?
10. Какие элементы входят в силовую цепь ВДП?
11. С помощью чего происходит включение и отключение ВДП?
12. Какие колебания тока допустимы в ВДП без ущерба качества слитка?
13. Какими характеристиками должны обладать источники питания ВДП?
14. Какие основные типы источников питания выпускает промышленность?
15. Что собой представляет ПИТ и какими характеристиками он обладает?
16. Какие функции выполняет САУ?
17. В чём заключается опасность при работе на ВДП?

## 4.5 Плазменные дуговые печи и установки

### 4.5.1 Физические основы и область применения плазменного нагрева.

Термин "плазма" введен в 1923 г. И. Ленгмюром и Д. Тонксом для обозначения особого состояния вещества, при котором отсутствует порядок в расположении частиц, что делает его подобным газу, но в отличие от газа частицы взаимодействуют друг с другом на больших расстояниях. Такими свойствами обладает газ, образованный не электронейтральными молекулами и атомами, а частицами, несущими заряд – ионами, электронами, протонами и др.).

Плазма образуется при любых формах электрического разряда в газах, в том числе и при дуговом.

Сжатие дуги газовым потоком или внешним магнитным полем приводит к более устойчивому её горению, значительному увеличению плотности тока, вследствие чего возрастает степень ионизации частиц, к повышению температуры столба дуги до  $(10-20) \cdot 10^3$  К и более (дуга, свободно горящая в воздухе, имеет температуру столба 6000-8000 К), повышению градиента потенциала в столбе дуги и более высокой концентрации мощности. Такую дугу называют интенсивной, стабилизированной или чаще всего *плазменной*.

С увеличением температуры увеличивается степень ионизации газа. Так, при температуре около 10000 К степень ионизации паров ряда металлов достигает 0,5. Такое высокоионизированное состояние вещества называют *низкотемпературной плазмой* ( $10^3 - 10^4$ ) К. При этом подразумевается, что в такой плазме число положительно и отрицательно заряженных частиц в единице объема одинаковы (квазилинейная плазма) и что вещество находится в состоянии термодинамического равновесия.

Для того, чтобы газ оказывал на дугу стабилизирующее действие, его скорость должна быть весьма большой; она может превышать скорость звука.

В металлургических плазменных установках сжатие дуги осуществляется обычно давлением плазмообразующего газа (плазмообразующей среды). Она может быть одно – и многокомпонентной. В качестве однокомпонентной плазмообразующей среды применяют аргон, гелий, азот и водород. Подбором состава многокомпонентной плазмообразующей среды в плазменной установке (например, азот + водород; аргон + водород; аргон + гелий и т.п.) можно получить любую атмосферу: окислительную, восстановительную или нейтральную.

Высокие температуры и концентрация энергии в потоке плазмы обусловили широкое её применение для различных технологических процессов. Плазму применяют для выплавки и переплава металлов и сплавов, для проведения рудовосстановительных процессов, для сварки и резки цветных и тугоплавких металлов и сплавов, полупроводников, минералов и керамики; для нанесения антикоррозийных, жаростойких и износостойчивых покрытий, для изготовления деталей методом плазменного напыления; для скоростного бурения твердых пород; для получения веществ с помощью химических реакций и т.д.

### 4.5.2 Классификация и конструктивное исполнение плазмотронов.

*Плазмотрон* – это устройство, служащее для генерирования низкотемпературной плазмы путем продувания газа через электрический дуговой разряд. Несмотря на разнообразие конструкций, все плазмотроны имеют три основных элемента: электрод, сопло и изолятор, их разделяющий (рис. 4.24).

Сжатая дуга возбуждается поэтапно, что обусловлено относительно большим расстоянием между электродом *1* и изделием *9*. Сначала в камеру функционирования электрода *К* подается плазмообразующий газ, не проводящий электрический ток. Затем с помощью осциллятора *11* в промежутке между электродом *1* и верхним срезом канала сопла *10* создают высоковольтный электрический разряд.

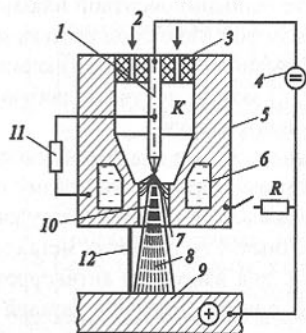
Плазмообразующий газ, проходящий через него, частично ионизируется и приобретает свойство проводника электрического тока, создавая благоприятные условия для возбуждения малоамперной дежурной дуги *7*. Через 1-3с возникает дежурная дуга, питающаяся от источника питания *4* через ограничительное сопротивление *Р*. Осциллятор отключается. Плазмообразующий газ *2*, проходящий через дуговой электрический разряд дежурной дуги, ионизируясь, образует поток плазмы, который этим же газом выдувается (в виде факела) и касается изделия *9*. В момент касания мгновенно возбуждается основная сжатая дуга *8* между электродом и изделием. После возбуждения сжатой дуги отключается дежурная дуга.

Надежная работа плазмотрона обеспечивается охлаждением канала сопла проточной водой (отводом теплоты, поступающей в сопло) и электрической изоляцией стенок канала сопла тончайшим слоем плазмообразующего газа, движущегося в промежутке между столбом сжатой дуги и стенками канала сопла.

Дуговые плазмотроны можно подразделить на *высоковольтные* (2000-6000 В, 50-500 А) и *низковольтные* (100-800 В, 2000-10000 А). У первых дуга более длинная, с развитой поверхностью, приспособленной для нагрева газов, у вторых более концентрировано выделение энергии.

По роду тока различают плазмотроны *постоянного* тока, *переменного* тока промышленной частоты и *высокочастотные*. В настоящее время подавляющее количество плазмотронов работает на постоянном токе, так как сильное охлажде-

ние дуги переменного тока газом приводит к её неустойчивости: дуга обрывается при переходе тока через нуль.



1 - электрод; 2 - плазмообразующий газ; 3 - изолятор; 4 - источник питания; 5 - сопло; 6 - охлаждающая вода; 7 - дежурная дуга; 8 - сжатая дуга; 9 - изделие; 10 - канал сопла; 11 - осциллятор; 12 - двойная дуга.

Рисунок 4.24 - Конструкция плазматрона

По характеру воздействия на объект нагрева различают:

1) плазмтроны *косвенного действия* (струйные, рис. 4.25,а), служащие для создания только струи плазмы, где оба электрода принадлежат самому плазмтронному, а сформированная соплом плазменная струя не несет тока дуги (режим работы - *плазменная струя*);

2) плазмтроны *прямого действия* (плавильные, рис. 4.25,б), служащие для обработки электропроводных тел, где объект нагрева является одним из электродов - обычно анодом. Такие плазмтроны называют еще плазмтронами с вынесенной дугой или работающими в режиме *плазменной дуги*.

*Струйные плазмтроны* применяются для высокотемпературного нагрева (в пределах 2000-6000 К) практически всех видов газов. Они могут быть разделены на две группы, отличающиеся способом стабилизации дуги: линейные и плазмтроны с поперечно обдуваемой дугой - коаксиальные.

*Плавильные (дуговые) плазмтроны* в отличие от струйных имеют только один электрод. Вторым электродом является непосредственно нагреваемый материал. Эти плазмтроны используются в плавильных электропечах, для резки металлов, нагрева ленты и проволоки.

Срок службы плазмтрона определяется скоростью эрозии его электродов, которая пропорциональна току. Поэтому при необходимости увеличения мощности плазмтрона повышают напряжение на дуге.

Для обеспечения длительного ресурса работы электродных систем дуговых плазмтронов применяют электроды из тугоплавких материалов (С, Мо, W, Zr, Hf).

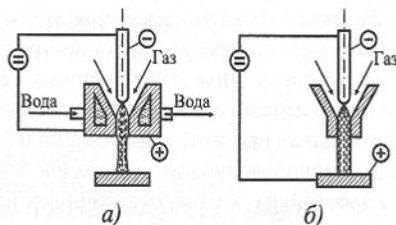


Рисунок 4.25 - Схемы плазмтронов  
а - косвенного действия;  
б - прямого действия.

В плазменных плавильных печах в качестве плазмообразующего газа применяется аргон. При проведении процессов азотирования, восстановления, обезуглероживания, выжигания примесей и т.д. плазмообразующими газами являются азот, водород, кислород, воздух.

Плазмтроны переменного тока промышленной частоты бывают однофазными и трехфазными. *Однофазные плазмтроны* конструктивно схожи с ранее рассмотренными. *Трехфазные плазмтроны* представляют собой комбинации из трех однофазных.

По конструктивным особенностям различают одно- и многокамерные трехфазные плазмтроны. В случае однокамерных плазмтронов все три дуги горят в одном объеме. Устойчивость дугового разряда обеспечивается применением тугоплавких электродов, сохраняющих высокую эмиссионную способность при перемене полярности тока.

*Высокочастотные плазмтроны* (рис. 4.25) подразделяют на индукционные, емкостные, факельные и сверхвысокочастотные (СВЧ).

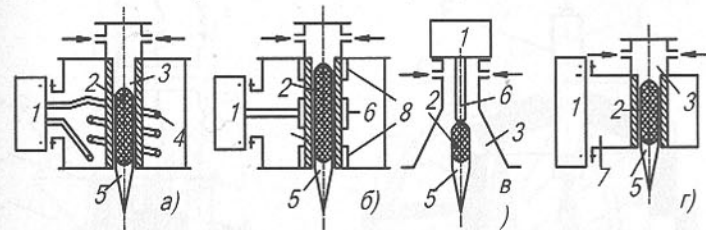


Рисунок 4.26 - Схемы высокочастотных плазмтронов

Высокочастотные плазмтроны включают в себя электромагнитную катушку - индуктор 4 или электроды 6,8, подключенные к источнику высокочастотной энергии 1, разрядную камеру 3, узел ввода нагреваемого газа.

В *высокочастотном индукционном плазмтроне* (рис. 4.26,а) газ нагревается вихревыми токами, как при индукционном нагреве проводящей среды в переменном электромагнитном поле индуктора при частоте от 6,3 кГц до 20 МГц. В начале процесса для образования проводящей среды в зоне индуктора создается область высокотемпературного проводящего газа с помощью постороннего источника (например, дуговой разряд). Этот процесс называют зажиганием. После зажигания в камере возникает самоподдерживающийся стационарный безэлектродный разряд 2. Продувая газ через разрядную камеру, на выходе из неё получают струю плазмы 5 с температурой  $(7,5-15,0) \cdot 10^3$  К со скоростью 10-60 м/с.

*Высокочастотный емкостной плазмтрон* (рис. 4.26,б) имеет высоковольтный 6 и заземленный 8 электроды, между которыми возникает высокочастотное электрическое поле. Электроны, находящиеся в газе, получают энергию от высокочастотного электрического поля и при столкновениях обмениваются ею с нейтральными частицами, повышая тем самым температуру газа.

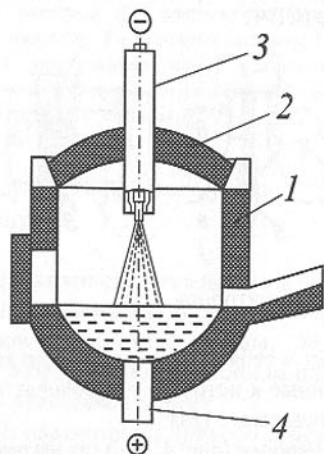
В *высокочастотном факельном плазмтроне* (рис. 4.26,в) при давлении, близком к атмосферному, факельный разряд имеет форму пламени свечи. Наиболее

легко факельный разряд возникает на электродах с большой кривизной поверхности (на остриях и т.д.) при частотах электрического поля порядка 10 МГц и выше.

В СВЧ-плазмотроне (рис. 4.26,з) энергия от источника питания в зону разряда подается по волноводу 7.

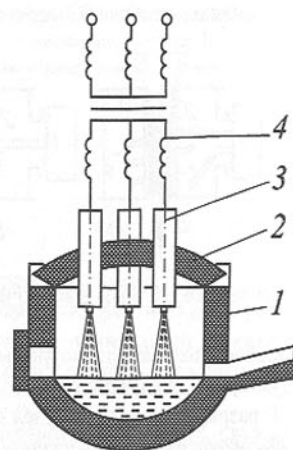
Высокочастотные плазмотроны имеют широкие перспективы применения в химической и металлургической промышленности благодаря большому ресурсу работы (2-3 месяца без замены деталей), возможности получения чистой плазмы агрессивных газов, таких как хлор, кислород и др., т.е. без засорения продуктами разрушения электродов. Однако пока они имеют более низкий, чем дуговые плазмотроны, энергетический КПД и сложные источники питания.

**4.5.3 Плазменные плавильные печи и установки.** Плазменные плавильные печи выполняют трех типов: для плавки в керамическом тигле, для плавки в кристаллизаторе, для плавки в гарнисаже.



1 – футеровка; 2 – свод; 3 – плазмотрон;  
4 – подовый электрод

Рисунок 4.27 – Печь постоянного тока с керамическим тиглем



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – плазмотрон;  
4 – питающий трансформатор

Рисунок 4.28 – Схема плавильной трёхфазной электропечи с плазмотронами

В печах с керамическим тиглем (рис. 4.27 и 4.28) плавят сталь и сплавы на никелевой основе или переплавляют высоколегированные отходы. Эти печи аналогичны дуговым сталеплавильным печам, так же как и последние имеют футерованную камеру, закрытую сводом, набивную подину, но вместо электродов в плавильное пространство вводится один или несколько плазмотронов. Плазмотроны вводятся через свод или наклонно через стены.

В печах постоянного тока (рис. 4.27) катодом служит электрод плазмотрона, а анодом ванна жидкого металла, ток к которой подводится подовым электродом 4. Подовый электрод выполняется водоохлаждаемым, медным.

В трехфазных печах (рис. 4.28) количество устанавливаемых плазмотронов 3кратно трём. Электрод каждого плазмотрона подсоединен к фазе питающего

трансформатора 4, а расплавляемый металл служит нулем "звезды", образованной плазмотронами.

Плазменные электропечи работают при относительно длинных дугах, что сказывается на стойкости стен плавильной камеры. Поэтому их выполняют из высокоогнеупорных термостойких материалов (например, хромомагнетитового кирпича). Место ввода плазмотрона в печь герметизируется, что защищает печь от подсосов воздуха и позволяет сохранять в печи заданную атмосферу.

Печи для плавки в кристаллизаторе (рис. 4.29) представляют собой камеру 6, в которую сверху вводится расплавляемый электрод 1 и один или несколько плазмотронов 2, последние оплавливают электрод и поддерживают часть металла 3 в кристаллизаторе 4 в жидком состоянии. По мере наплавления слитка 5 он с помощью механизма, сопряженного со штоком 7, перемещается вниз. Для обеспечения равномерного оплавления расплавляемого электрода последний вращается и по мере оплавления опускается.

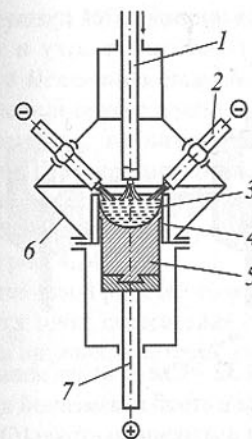


Рисунок 4.29 – Плазменная печь для плавки в кристаллизаторе

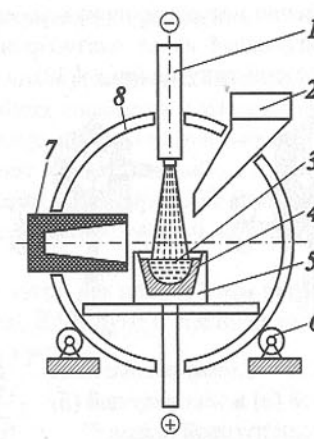


Рисунок 4.30 – Плазменная печь для плавки в гарнисаже

Материал, из которого изготовлены катоды плазмотронов, вследствие эрозии может попасть в наплавляемый слиток и загрязнить его.

Печи для плавки в гарнисаже (рис. 4.30) предназначены для получения фасонного литья. В них можно плавить кусковую шихту и отходы. Печи могут использоваться для плавки керамики и получения керамического литья.

Конструктивно печь состоит из камеры 8, в которую введен плазмотрон 1. Плавка осуществляется в охлаждаемом тигле 5. При этом на стенках тигля образуется слой затвердевшего расплава – гарнисажа 4, предохраняющего тигель от контакта с жидкой ванной 3. На печи установлен дозатор 2, из которого шихта добавляется в тигель. По окончании плавки механизм 6 осуществляет наклон печи с целью слива металла из тигля в изложницу или форму 7.

Эти печи отличаются отсутствием расходующего электрода и возможностью выдерживать ванну с жидким металлом длительное время для легирования, перемешивания с целью выравнивания состава и взятия проб.

Плазменные установки применяются для нанесения коррозионно-стойких, жаропрочных и других защитных покрытий методами напыления и наплавки.

При напылении плазмой частицы наносимого материала расплавляются и разгоняются до высоких скоростей, а деталь, на которую наносится покрытие – подложка, разогревается до высоких температур. При доведении подложки до состояния плавления процесс напыления переходит в наплавку. Наносимый на подложку материал может представлять собой электропроводную проволоку или стержни, а также неэлектропроводный в холодном состоянии порошок.

При использовании проволоки или прутков процесс образования двухфазного напыляющего потока (плазма+ наносимый материал в жидком состоянии) проходит по схемам, показанным на рис. 4.31.

Напыление неэлектропроводных материалов производится путем ввода порошков в разрядный канал плазматрона двумя способами: в дугу и в участок плазменной струи за дугой (рис. 4.32).

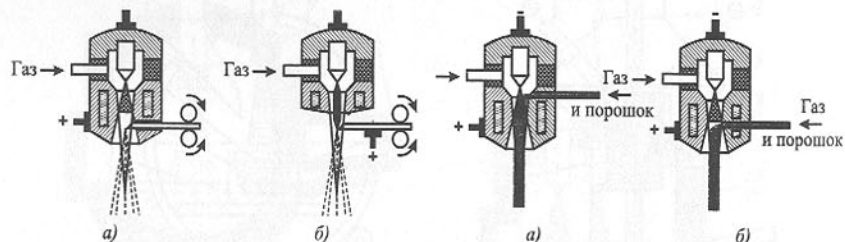


Рисунок 4.31 – Схемы распыления нейтральной (а) и токоведущей (б) проволоки дуговой плазмой

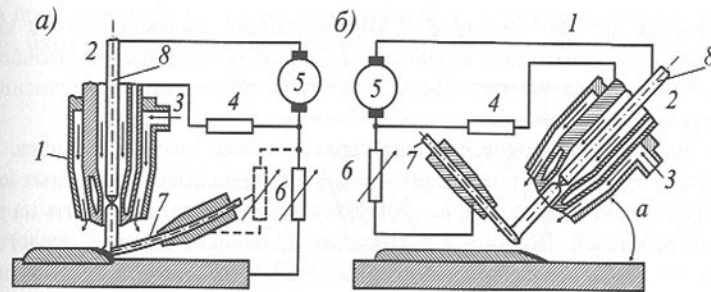
Различие в способах введения порошка определяется его теплофизическими свойствами. Тугоплавкие порошки вводятся в зону дуги, легкоплавляемые - в струю плазмы.

При плазменной наплавке изделие и наносимый материал включаются в цепь тока через токоограничивающие сопротивления (рис. 4.33). Скорость подачи материала и перемещения горелки по обрабатываемой поверхности согласуется с тепловой мощностью плазменной струи и контролируется технологом.

Совмещенные схемы плазменного напыления и наплавки позволяют получить прочно сплавленный с подложкой слой наплавленного материала.

В состав установок плазменного нанесения покрытий входят дозаторы наносимого материала, источники электрического питания, система газоснабжения и охлаждения плазматрона.

Кроме рассмотренных имеется большое количество других плазменных процессов, описание которых можно найти в специальной литературе.



а – изделие под током; б – изделие обесточено;  
1 – горелка; 2 – ввод плазмообразующего газа; 3 – канал для ввода защитного газа;  
4 – ограничительное сопротивление; 5 – источник питания;  
6 – балластное сопротивление; 7 – присадочная проволока; 8 – электрод.

Рисунок 4.33 – Схема наплавки с присадочной проволокой

**4.5.4 Источники питания плазменных установок.** Электродуговые плазменные печи и другие плазменные установки относятся к классу сложных нелинейных нагрузок, для питания которых неприменимы источники питания общего назначения. При плазменно-дуговой плавке существенные отклонения тока при изменении напряжения дуги снижают стабильность процесса расплавления и могут привести к двойному дугообразованию (возникновению дополнительной дуги на сопло, рис. 4.24).

Устойчивой рабочей точкой цепи с дугой как нелинейным проводником тока является точка пересечения статической ВАХ дуги и внешней характеристики источника питания, в которой выполняется условие

$$\frac{dU_{\text{ист}}}{dl} < \frac{dU_{\text{д}}}{dl} \quad (4.26)$$

где  $U_{\text{ист}}$  – статическое напряжение источника питания;

$U_{\text{д}}$  – статическое напряжение дуги.

Следовательно, источник питания для обеспечения стабильности горения дуги и требований технологического процесса должен иметь внешние крутопадающие или вертикальные характеристики. Так как для управления плазменными установками требуется всегда управляемый источник питания, то в промышленности для питания дуговых плазматронов получили применение следующие типы источников питания с крутопадающей внешней характеристикой:

- 1) источники на базе управляемого выпрямителя с автоматической стабилизацией тока;
- 2) источники с дросселями насыщения и магнитоуправляемыми трансформаторами;
- 3) параметрические источники тока ПИТ, работающие на принципе резонанса напряжений в трехфазных электрических цепях.

Источник первого типа (рис. 4.34) изготовляют индивидуально к каждой плазменной технологической установке, содержащей мощные высоковольтные плазмотроны; они включаются в общую схему автоматического управления технологическим процессом.

На рис. 4.35 приведена внешняя характеристика такого источника. Нелинейный характер ВАХ дуги приводит к возникновению высокочастотных колебаний, которые могут проникать в питающую сеть и отрицательно влиять на работу других потребителей. Поэтому для создания источников питания первого типа применяется схема со сглаживающим дросселем (реактором) в цепи дуги (рис. 4.34), который в значительной степени сужает частотный спектр возмущений, влияющий на электрическую систему в целом.

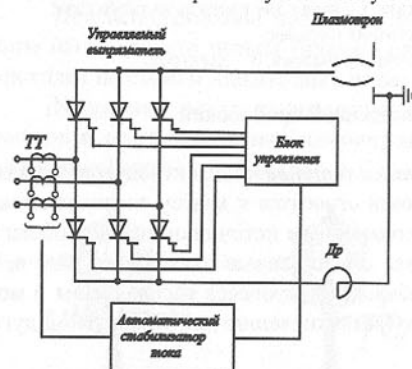


Рисунок 4.34 – Схема источника с автоматической стабилизацией тока

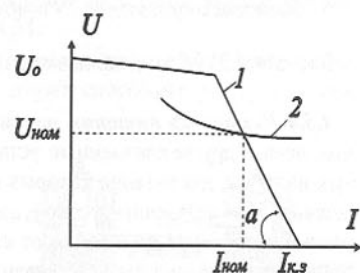


Рисунок 4.35 – Внешняя характеристика управляемого источника питания плазмотрона (1) и вольт-амперная характеристика плазмотрона (2)

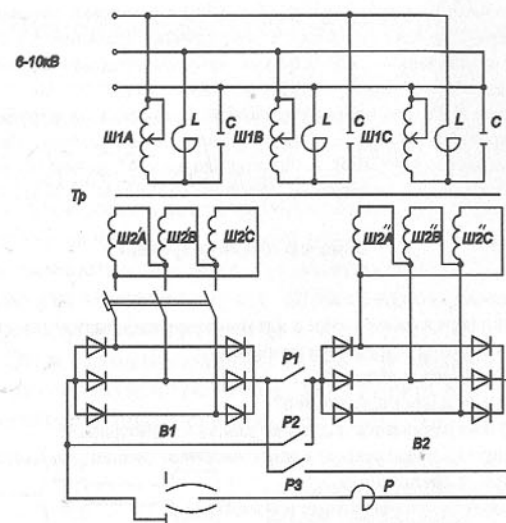
Наличие сглаживающего реактора в цепи дуги приводит к существенным перенапряжениям при зажигании и погасании дуги. Для защиты электрооборудования и плазмотронов от перенапряжений используют устройства защиты, работающие на принципе пробоя лавинных полупроводниковых диодов.

В ПДУ с управляемым источником питания дугу зажигают вспомогательным электродом или с помощью высокочастотного осциллятора.

Источники второго и третьего типов стандартные и применяются для питания низковольтных плазмотронов, используемых в технологических процессах плазменного напыления, наплавки, резки, сварки, переплава металла и др.

В источниках второго типа крутопадающая внешняя характеристика достигается за счет встречно-параллельного соединения обмоток дросселя насыщения. Плавное регулирование рабочего тока осуществляется путем изменения тока в обмотке подмагничивания. Запуск плазмотрона производится от основного источника следующим образом. С помощью осциллятора производится возбуждение разряда, в результате чего в промежутке сопло-катод возникает вспомогательная дуга. Увеличивая подачу газа добиваются выдувания вспомогательной

дуги в пространство печи и зажигания рабочей дуги между катодом и обрабатываемым материалом, являющимся анодом.



В1, В2 – выпрямители; Р – сглаживающий реактор; Тр – силовой трансформатор

Рисунок 4.36 – Схема параметрического источника тока

На рис. 4.36 приведена схема параметрического источника тока. Крутопадающие статические характеристики ПИТ хорошо согласуются с характеристиками дуги и обеспечивают достаточную устойчивость последней. За счет параметрического резонанса, лежащего в основе ПИТ, достигаются высокие энергетические показатели, в частности  $\cos \varphi$ . Однако они не имеют возможности плавно автоматически управлять током плазмотрона. Это затрудняет их использование в системах автоматического управления рабочим процессом в плазменных установках.

Высокочастотные плазменные установки питаются от ламповых преобразователей частоты.

**Техника безопасности.** При проектировании и эксплуатации плазменных дуговых установок (ПДУ) необходимо в полной мере соблюдать требования разделов ПУЭ и "Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и техники безопасности при эксплуатации установок потребителей", касающихся преобразовательных установок до и свыше 1000 В. Печи с керамическим тиглем в отношении охраны труда аналогичны ДСП. Кроме того, водоохлаждение узлов плазмотронов и подовых электродов, находящихся в герметизированном плавильном пространстве печи, создает опасность попадания воды в печь при авариях этих узлов и последующего парового взрыва. Поэтому установки печей должны оснащаться устройствами непрерывного контроля теплового режима ветвей водоохлаждения этих узлов и соответствующей аварийной сигнализацией. Это же относится к водоохлаждению электродов, сопел и кристаллизаторов ПДП, а также электродов и межэлектродных вставок струйных плазмотронов. На крышах (сводах) ПДУ целесообразна установка взрывных клапанов.

Плазмохимические установки для пиролиза нефтепродуктов и синтеза углеводородов принципиально взрывоопасны, так как в ходе этих процессов образуется водород, составляющий большую часть газовой смеси на выходе. Точно также взрывоопасны ПДУ, в которых в качестве

плазмообразующего газа применяется водород или другой восстановительный газ. Все подобные плазменные дуговые установки размещают в металлических или железобетонных боксах, снабжают взрывными клапанами, а в помещениях обязательна установка датчиков-анализаторов на водород. Приборы и средства автоматизации в этих случаях применяются не электрических, а пневматических систем; устанавливаемое в боксах электрооборудование должно иметь взрывобезопасное исполнение.

Газовое хозяйство ПДУ, как правило, включает в себя сосуды и трубопроводы высокого давления. Их проектируют и эксплуатируют со строгим соблюдением "Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением", подвергая регулярной ревизии и испытаниям, а обслуживающий их персонал проходит периодическую аттестацию.

### Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой плазма?
2. Чем осуществляется сжатие дуги в металлургических плазменных установках?
3. Какие газы являются плазмообразующими?
4. Для чего используется плазма?
5. Что собой представляет плазматрон?
6. За счёт чего обеспечивается надёжная работа плазматрона?
7. Как подразделяют плазматроны в зависимости от питающего напряжения, рода тока и характера воздействия на объект нагрева?
8. Какими бывают высокочастотные плазматроны?
9. Из каких материалов изготавливают электроды дуговых плазматронов?
10. Конструкция и работа ПДП с керамическим тиглем.
11. Конструкция ПДП для плавки в кристаллизаторе.
12. Конструкция ПДП для плавки в гарнисаже.
13. Какие существуют способы плазменного напыления?
14. Как осуществляется плазменная наплавка?
15. Условие устойчивого горения плазменной дуги.
16. Какие источники питания применяются для плазменной дуги?
17. От каких источников питаются высокочастотные плазменные установки?
18. Правила техники безопасности при эксплуатации плазменных дуговых установок?

## 5 УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

### 5.1 Технологический процесс электрошлакового переплава

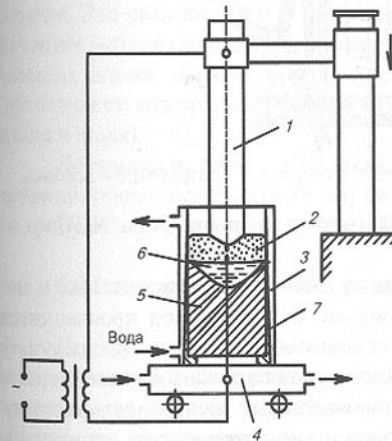
Основное назначение установок (печей) электрошлакового переплава (ЭШП) – производство слитков из высококачественных сталей: шарикоподшипниковых, конструкционных, нержавеющей, жаропрочных, теплостойких, валковых и др.

Слиток, полученный методом ЭШП, отличается от обычного слитка, отлитого в изложницу, отсутствием усадочной раковины, осевой пористости, чистотой по неметаллическим включениям, лучшей деформируемостью, благодаря чему повышается долговечность изделий из этих слитков в 2-2,5 раза.

Большое распространение получил ЭШП в производстве стальных слитков круглого и квадратного сечения массой до 5 т, являющихся заготовками для сортового проката. Этим методом получают также слитки прямоугольного сечения для листопрокатного производства. Метод ЭШП в последнее время находит применение для производства полых слитков, различного вида фасонных заготовок:

коленчатых валов, корпусов арматуры, баллонов высокого давления и других изделий, применение которых не только увеличивает срок службы изделий, но и обеспечивает сокращение расхода металла и затрат на механическую обработку (на 40-50%).

Сущность ЭШП, впервые предложенного Институтом электросварки им. Е.О. Патона АН УССР в 1952-1957 г.г. заключается в следующем (рис. 5.1). Расходуемый электрод 1 из переплавляемого металла погружается в слой электропроводящего флюса (шлака) 2, размещённого в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе 3, к которому примыкает водоохлаждаемый поддон 4. Электрический ток, пропускаемый через электрод и шлак, поддерживает шлак в расплавленном состоянии при температуре 1900-2300 К. Часть тепла, выделяемого в шлаковой ванне, передается контактирующему с ней электроду, торец которого оплавляется. Капли металла, стекающие с



- 1 – расходуемый электрод;
- 2 – шлаковая ванна;
- 3 – кристаллизатор;
- 4 – поддон;
- 5 – слиток;
- 6 – металлическая ванна;
- 7 – шлаковый гарнисаж.

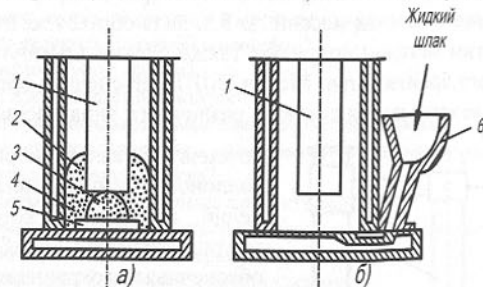
Рисунок 5.1 – Схема электрошлакового переплава

торца электрода, проходят через слой шлака, очищаются в результате физико-химического воздействия с ним и формируются в водоохлаждаемом кристаллизаторе в виде слитка 5. В процессе переплава в верхней части слитка на границе со

шлаковой ванны образуется ванна жидкого металла 6, а на боковой поверхности слитка – тонкая корочка затвердевшего шлака (гарнисаж) 7.

В конце плавки, когда расходуемый электрод расплавляется (кроме огарка, зажатого в электрододержателе), слиток заполняет кристаллизатор. Печь отключают, кристаллизатор откатывают на тележке в сторону и разгружают. Из электрододержателя извлекают огарок и вставляют новый расходуемый электрод. Затем под электрод подкатывают второй кристаллизатор, и начинается новая плавка. Таким образом, процесс ЭШП является периодическим, а установка ЭШП – печью периодического действия.

Полный цикл работы установки ЭШП разделяется на основной и вспомогательный периоды. *Основной период* плавки в свою очередь состоит из периодов переплава электрода (наплавления слитка) и выведения усадочной раковины.



1 – электрод; 2 – твердый шлак; 3 – запальная смесь; 4 – стружка; 5 – затравка; 6 – воронка.

Рисунок 5.2 – Схема твердого (а) и жидкого (б) стартов процесса ЭШП

В *вспомогательный период* осуществляется подготовка печи к плавке и наведение в кристаллизаторе ванны жидкого шлака. В этот период производятся следующие операции: остывание слитка в кристаллизаторе после предыдущей плавки; выгрузка слитка и застывшего шлака из кристаллизатора и удаление их с печи; снятие с печи огарков электродов и установка новых электродов в электрододержатель; чистка кристаллизатора и поддона и т.п. Длительность подготовительных операций на печах малой и средней емкости колеблется от 1,2 до 4,5 ч. После их окончания приступают к периоду наведения шлаковой ванны в кристаллизаторе. Технология *наведения шлаковой ванны*, т. е. разогрев ее до рабочей температуры и вывод печи на заданный электрический режим, может осуществляться с применением твердого или расплавленного шлака (так называемые твердый и жидкий старты процесса). При твердом старте (рис. 5.2, а) шлак расплавляют непосредственно в кристаллизаторе печи расходуемым электродом с использованием запальных смесей.

При жидком старте шлак предварительно расплавляют во флюсоплавильной печи, затем заливают в кристаллизатор либо сверху, либо сифонным способом (рис. 5.2, б). Особенно эффективным является второй способ, который широко применяется на многоэлектродных печах.

Шлаки (флюсы) для печей ЭШП должны соответствовать определенным требованиям. Они должны обладать высокой рафинирующей способностью; спо-

собностью формировать гладкую поверхность слитка, не требующую дополнительной механической обработки; достаточно высоким удельным электрическим сопротивлением.

Применение той или иной марки шлака (флюса) определяется конкретными технологическими условиями переплава металла заданного химического состава.

В период *наплавления слитка* основной задачей является достижение оптимальных условий наплавления, кристаллизации и очистки металла от примесей и газов. Процесс характеризуется спокойным электрическим режимом, толчки тока отсутствуют. Длительность периода наплавления слитка зависит от химического состава переплавляемого металла, размеров слитка и химического состава шлака.

Когда зеркало шлаковой ванны достигает нижнего уровня сливных отверстий кристаллизатора-изложницы или когда сплавляется годная часть электрода, приступают ко второму периоду – *выведению усадочной раковины*. Вывод служит для улучшения качества металла в верхней части слитка, что позволяет уменьшить его обрезь и повысить выход годного металла. Для осуществления вывода раковины вводимую в ванну мощность в конце плавки постепенно снижают.

Электрошлаковый переплав по своему принципу является бездуговым процессом. Это связано с тем, что при горении в шлаке дуги происходит ухудшение качества металла за счет его насыщения газами – продуктами разложения составляющих шлака. В связи с этим дуговой режим при ЭШП считается аварийным (дуга может возникнуть при недостаточном или чрезмерном заглублении электрода в шлак).

Достоинство печей ЭШП заключается в простоте и малой стоимости оборудования, поскольку работают они на переменном токе промышленной частоты и не требуют герметичности и дорогой вакуумной системы.

## 5.2 Классификация электрошлаковых печей

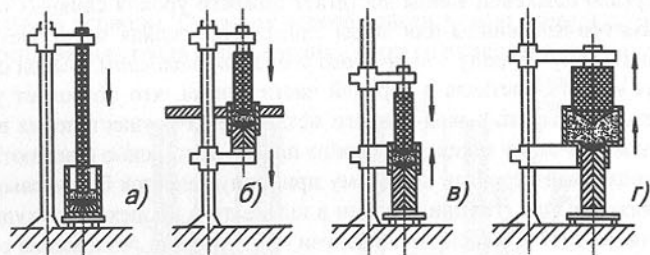
По характеру использования электрошлаковые печи могут быть специализированными и универсальными. *Специализированные* печи предназначены для производства слитков только по одной технологической схеме и применяются обычно при крупносерийном производстве металла одного и того же сортамента. *Универсальные* печи позволяют легко изменять технологическую схему (число электродов, форму сечения слитка, способ питания и т.д.). Такие печи значительно сложнее и применяются на машиностроительных заводах с разнообразным мелкосерийным сортаментом слитков.

Электрошлаковый переплав может быть осуществлен по разным схемам. Наиболее простой схемой ЭШП является переплав расходуемого электрода в глухонный кристаллизатор при их полной относительной неподвижности. Условием проведения переплава по такой схеме является равенство сечений электрода и слитка, вследствие чего при оплавлении электрода шлаковая ванна сама перемещается вверх.

Однако значительно чаще используют схемы ЭШП с относительным перемещением электрода и кристаллизатора (рис. 5.3). Наиболее простым и распространенным является переплав опускающихся электродов в глухонный непод-



вижный кристаллизатор (рис. 5.3, а). Переплав можно осуществить и в укороченные кристаллизаторы, при этом по мере наплавления слитка либо слиток вытягивают из неподвижного кристаллизатора (рис. 5.3, б), либо кристаллизатор перемещают относительно неподвижного слитка (рис. 5.3, в). При этих схемах перепада используют расходные электроды меньшего сечения, чем сечение слитка. Вместе с тем методом ЭШП можно перепалять электроды большего сечения, чем сечение получаемого слитка. В этом случае используют уширенные в верхней части короткие кристаллизаторы, которые по мере наплавления слитка перемещают вверх вслед за поднимающимся электродом (рис. 5.3, г).



а – электрод опускается, кристаллизатор и слиток неподвижны; б – электрод и слиток опускаются, кристаллизатор неподвижен; в – слиток неподвижен, электрод опускается, кристаллизатор поднимается; г – слиток неподвижен, электрод и кристаллизатор поднимаются.

Рисунок 5.3 – Схемы осуществления ЭШП с относительным перемещением электрода и кристаллизатора

Электрошлаковые печи подразделяются: по количеству электродов – на одно-, двух-, трех- и многоэлектродные; по форме сечения слитка – на печи для выплавки слитков круглого, прямоугольного, плоского и сложного сечений.

Выбор количества и формы электродов производится по заданному сечению слитка, исходя из наилучшего заполнения сечения кристаллизатора.

Многоэлектродные печи по своим конструктивным особенностям разделяются на печи с раздельными приводами электродов и печи с совместным перемещением всех электродов с помощью одного электропривода. В нашей стране применяются печи второго типа.

По способу электропитания электрошлаковые печи разделяются на одно-, двух-, трех- и многофазные. Наибольшее распространение получили однофазные одноэлектродные печи (рис. 5.4, а), однако из-за большого индуктивного сопротивления короткой сети имеют низкий коэффициент мощности и неудовлетворительные технико-экономические показатели.

Для получения слитков прямоугольного сечения предпочтительна двухэлектродная бифилярная печь, питающаяся от однофазного трансформатора с выведенной или искусственно созданной нулевой точкой (рис. 5.4, б). Преимуществом ее перед обычными однофазными являются более высокий коэффициент мощности, меньший расход электроэнергии (на 25-30%) и повышение производительности.

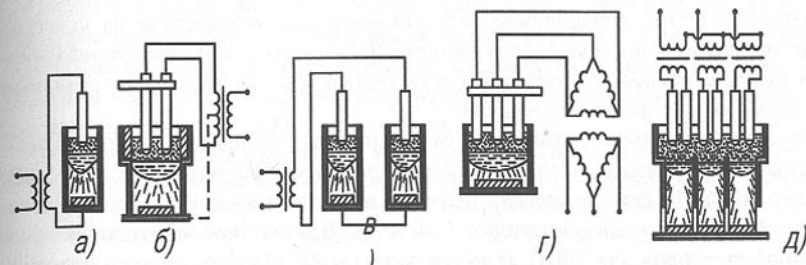


Рисунок 5.4 – Схемы питания печей ЭШП

Схема с последовательным подключением двух печей к одному трансформатору (рис. 5.4, в) позволяет выплавлять одновременно два слитка круглого или квадратного сечения. Она обеспечивает высокие технико-экономические показатели вследствие бифилярности электродов и короткой сети, сокращение протяженности токоведущих элементов и уменьшения потребной производственной мощности. Трехфазные печи имеют число электродов, кратное трем, и питаются от трехфазных трансформаторов (рис. 5.4, г). Они имеют лучшие энергетические показатели по сравнению с однофазными одноэлектродными, но обладают меньшим коэффициентом заполнения кристаллизатора, в результате чего увеличивается длина электродов и, следовательно, высота печи.

В качестве многофазных в настоящее время применяются шести- и семиэлектродные, которые питаются от трех однофазных трансформаторов (рис. 5.4, д).

Однофазные печи ЭШП создают в трехфазной сети несимметрию фазных напряжений, поэтому здесь часто используют симметрирующие устройства, выполненные на базе реактивных ( $L-C$ ) элементов. Большое количество однофазных печей ЭШП в цехе позволяет создать симметричную нагрузку на трехфазную питающую сеть.

В нашей стране применяются следующие основные типы электрошлаковых печей: однофазные специализированные печи Р-951 (до 2 т), ОКБ-905 (до 4 т), ОКБ-1065 (до 6 т), ОКБ-1111 (до 60 т); бифилярные специализированные печи У-552М (до 5 т), ОКБ-1429 (до 8 т), У-436 (до 10 т), ЭШП-20ВГ (до 20 т); универсальные печи – четырехэлектродная двухфазная печь ЭШП-40, однофазная 6-ЭШП-20СВ, шести- и семиэлектродные ЭШП-75 и ЭШП-150/200.

### 5.3 Электрооборудование печей ЭШП

Питание печей ЭШП может осуществляться переменным или постоянным током. Исследования качества металла при ЭШП с использованием постоянного и переменного токов показали, что наилучшим это качество оказывается при переменном токе. Это связано с улучшением рафинирования металла из-за развитой электрокапиллярной вибрации поверхности жидкого металла. Возникающий при использовании постоянного тока электролиз некоторых составляющих шлака

практически неуправляем, что чаще всего ведет к вредному его влиянию на свойства металла слитка. Управляемое электрохимическое воздействие на качество металла возможно лишь при использовании для питания печей несинусоидального тока с искусственной постоянной составляющей тока, создаваемой с помощью специальных тиристорных источников.

Электрошлаковые печи питаются от специальных печных трансформаторов – однофазных и трехфазных. Первичное напряжение трансформаторов 6, 10, 35 кВ; вторичное 30-260 В, регулируемое в широких пределах (число ступеней напряжения 5-49). Мощность трансформаторов 1-10 МВА. Важной особенностью однофазных трансформаторов для ЭШП является выполнение обмотки низкого напряжения с выведенной средней точкой, что обеспечивает их универсальность при питании печей по различным схемам. Вместе с тем это усложняет конструктивно, увеличивает потери энергии и габариты трансформатора.

Токоподвод электрошлаковой печи, определяющий ее энергетические характеристики, состоит из короткой сети и электродов. В короткую сеть входят шинопровод из медных шин, верхняя и нижняя (для однофазных печей) кабельные гирлянды и трубошины для подведения тока к электрододержателям.

Естественный коэффициент мощности установок ЭШП зависит от индуктивности короткой сети и габаритов (массы слитка) печи.

У однофазных установок ЭШП с массой слитка 2,5-40 т коэффициент мощности составляет (в среднем): 0,6-0,75 при одноэлектродной схеме электродподдон; 0,8-0,9 при двухэлектродной схеме бифилярной. У трехфазных установок ЭШП коэффициент мощности 0,75-0,9. Большее значение коэффициента мощности для установок с меньшей массой слитка.

Из-за больших тепловых потерь в кристаллизаторе, КПД установок низок, а удельный расход электроэнергии достигает 1000-1200 кВтч/т.

Для питания мощных печей ЭШП применяют тиристорные преобразователи пониженной частоты (ТПЧ), на частоту 5-15 Гц, что позволяет снизить индуктивное сопротивление токоподвода, повысить  $\cos \varphi$  печи и т. п. Симметрирующего устройства в этом случае не требуется.

Электрошлаковые печи могут иметь до трех электроприводов: перемещения электрода, перемещения кристаллизатора и привод тележки поддона для выгрузки слитка.

Привод перемещения электродов – электромеханический с двигателем постоянного тока с тиристорным преобразователем. Привод обеспечивает регулируемую в широком диапазоне рабочую скорость подачи электродов, необходимую для компенсации сплавления электродов.

Необходимая мощность, выделяющаяся в шлаковой ванне, поддерживается автоматически специальными регуляторами, которые в зависимости от выбранной схемы реагируют на изменение силы тока, напряжения или сопротивления шлаковой ванны. Напряжение и сила тока поддерживаются изменением длины межэлектродного промежутка и переключением ступеней напряжения печного трансформатора.

В установках ЭШП с электромеханическим приводом электродов используются тиристорные регуляторы серии АРШМТ, которые имеют два канала: 1) для

регулирования тока электрода или сопротивления шлаковой ванны изменением напряжения источника питания; 2) для регулирования скорости плавления электрода с воздействием на привод перемещения электродов. Для поддержания электрического режима по заданной программе эти регуляторы снабжают программным устройством – комплексом блоков координатно-временного управления двумя любыми параметрами в зависимости от третьего.

**Техника безопасности** для всех видов печей ЭШП основывается прежде всего на правилах и мерах безопасности, применяемых к цеховому электрооборудованию, работающему при напряжении до и выше 1000 В, оговоренных в Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей.

#### Вопросы для самопроверки

1. Какое основное назначение установок электрошлакового переплава?
2. В чем заключается сущность ЭШП?
3. Из каких периодов состоит полный цикл работы установок ЭШП?
4. Что осуществляется во вспомогательном периоде?
5. В чем заключается сущность твердого старта?
6. В чем заключается сущность жидкого старта?
7. Что происходит в период наплавления слитка?
8. Для чего необходимо выведение усадочной раковины?
9. Каковы достоинства печей ЭШП?
10. Как подразделяются электрошлаковые печи по количеству электродов?
11. Как подразделяются электрошлаковые печи по способу электропитания?
12. Как осуществляется питание мощных печей ЭШП?

## 6 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ

### 6.1 Физико-технические основы электронного нагрева

Патент на плавку металлов с помощью катодных лучей был выдан в 1905 г., но возродился этот метод лишь в 1956 г.

Электронно-лучевой нагрев применяется для плавки тугоплавких и химически активных металлов, сварки, выращивания монокристаллов, металлизации и напыления, спекания, зонной очистки, термообработки и размерной обработки твердых и тугоплавких металлов и т. д.

Метод электронно-лучевого нагрева имеет следующие преимущества по сравнению с другими видами нагрева:

- 1) возможность в широких пределах плавно изменять удельную мощность в зоне нагрева (от  $10^6$  до  $10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>);
- 2) возможность управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы;
- 3) возможность использования вакуума как рабочей среды;
- 4) возможность значительного перегрева металла и практически неограниченного времени его выдержки в жидком состоянии;
- 5) возможность легирования, применения раскислителей, флюсов и т. п.

К недостаткам этого вида нагрева следует отнести сложность изготовления, эксплуатации и высокую стоимость электронно-лучевого оборудования.

Физическая сущность нагрева электронным лучом заключается в преобразовании кинетической энергии ускоренных в электростатическом поле между катодом и анодом электронов, эмитированных катодом, в тепловую энергию при их торможении о поверхность нагреваемого объекта.

Поток электронов, генерируемый специальным устройством – электронной пушкой, под действием электростатического поля ускоряется и приобретает энергию  $W_e$  (эВ)

$$W_e = m_e v_e^2 / 2 = e_0 U_y, \quad (6.1)$$

где  $m_e$ ,  $e_0$  - масса и заряд электрона;

$U_y$  - ускоряющее напряжение, В;

$v_e$  - скорость электрона, прошедшего электрическое поле, м/с

$$v_e = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U_y}. \quad (6.2)$$

Кинетическая энергия электронов в плавильных электронно-лучевых установках (ЭЛУ) составляет  $(10-30) \cdot 10^3$  эВ, а скорость электронов –  $(0,6-1) \cdot 10^8$  м/с.

В электронном луче (пучке) электроны отталкиваются друг от друга и пучок расширяется. Для получения острого, сконцентрированного пучка необходимо

повысить ускоряющее напряжение, а на пути пучка применить магнитную фокусировку, сжимая его магнитным полем. Мощность электронного луча

$$P_{\text{л}} = I_{\text{л}} U_y, \quad (6.3)$$

где  $I_{\text{л}}$  - ток электронного луча, А;

$U_y$  - ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в луче

$$P_{y,\text{л}} = P_{\text{л}} / S_{\text{л}} = I_{\text{л}} U_y / (\pi r_{\text{л}}^2). \quad (6.4)$$

Здесь  $S_{\text{л}}$ ,  $r_{\text{л}}$  - поперечное сечение и радиус луча на обрабатываемой поверхности.

Ток электронного луча, формируемого электронной оптической системой (ЭОС), определяется в соответствии с вольт-амперной характеристикой пушки

$$I_{\text{л}} = p U_y^{3/2}, \quad (6.5)$$

где  $p$  – первеанс (проводимость) ЭОС данной промышленной электронной пушки; лежит в пределах от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup>. Первеанс определяется геометрией электродов (катода, анода и расстояния между ними) и не изменяется при пропорциональном их изменении.

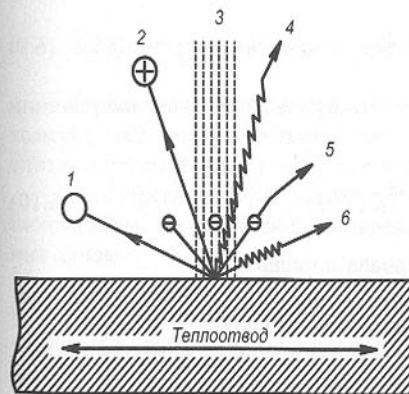
Глубина проникновения в металл электронов,  $m$ , с энергией  $(5-100)$  эВ может быть определена по формуле Шонландта:

$$b = 2,1 \cdot 10^{-17} U_y^2 / \gamma, \quad (6.6)$$

где  $U_y$  - ускоряющее напряжение, В;

$\gamma$  - плотность металла мишени, кг/м<sup>3</sup>.

Для применяемых в плавильных электронно-лучевых печах (ЭЛП) ускоряющих напряжений  $U_y = 20-40$  кВ, глубина проникновения электронов в металл  $b = 0,005$  мм. Это показывает, что электронный нагрев является чисто поверхностным нагревом и, следовательно, передача тепла основной массе металла осуществляется теплопроводностью или



1 – молекулы металла;

2 – ионы;

3 – луч;

4 – рентгеновское излучение;

5 – отраженные и вторичные термоэлектроны;

6 – тепловое излучение

Рисунок 6.1 – Схема физической картины явлений, сопровождающих проникновение электронов в вещество

конвекцией (в расплаве).

Начальная мощность  $P_0$  электронного пучка, вводимая в ЭЛУ, определяется по формуле:

$$P_0 = I_d U_y = p U_y^{5/2}. \quad (6.7)$$

При столкновении пучка ускоренных электронов с поверхностью металла основная часть кинетической энергии пучка  $P_0$  превращается в толще металла в тепловую энергию ( $P_{пов}$ ), часть (при резком торможении) идет на создание энергии рентгеновского излучения ( $P_{рен}$ ), а часть – на отражение ( $P_{отр}$ ) и создание вторичной эмиссии электронов с бомбардируемой поверхности ( $P_{вт}$ ). В свою очередь, тепловая энергия  $P_{пов}$  расходуется на непосредственный нагрев металла ( $P_{пол}$ ) и на покрытие потерь, связанных с испарением металла в виде атомов и ионов металла ( $P_{исп}$ ), излучением тепла ( $P_{изл}$ ) и теплопроводностью через слиток к кристаллизатору ( $P_{кр}$ ) и штоку ( $P_{шт}$ ) (рис. 6.1).

$$P_0 = P_{пов} + P_{рен} + P_{вт} + P_{отр}, \quad (6.8)$$

$$P_{пов} = P_{пол} + P_{исп} + P_{изл} + P_{кр} + P_{шт}. \quad (6.9)$$

Мощность рентгеновского излучения, Вт, при ускоряющем напряжении  $U_y=100$  кВ можно определить по формуле:

$$P_{рен} = 3 \cdot 10^{-3} I_d U_y^{1,75} Z, \quad (6.10)$$

здесь  $Z$  - атомный номер элемента материала мишени.

Энергия рентгеновского излучения в ЭЛУ не превышает 0,5% энергии падающего электронного пучка и в расчетах может не учитываться.

Однако с увеличением ускоряющего напряжения мощность излучения быстро возрастает и при напряжениях, превышающих 20 кВ, рентгеновское излучение может представлять опасность для обслуживающего персонала. При напряжениях более 50 кВ защита обслуживающего персонала от излучения становится очень сложной, поэтому установки с таким ускоряющим напряжением не строят.

Мощность электронной пушки для заданного технологического процесса можно рассчитать по значению полезных затрат мощности на расплавление и перегрев (или на нагрев до заданной температуры) металла. А вся мощность, потребляемая ЭЛУ из сети, расходуется на компенсацию потерь: в блоке питания, в электронной пушке, в рабочей камере, в вакуумной системе, в механизмах установки.

Электрический КПД всей ЭЛУ определяется:

$$\eta_{\Sigma} = P_{пад} / P_y = \eta_n \eta_{п} \eta_{пр} \approx 0,6 - 0,8, \quad (6.11)$$

где  $P_{пад} = P_{пол} + P_{отр}$  - мощность падающего на поверхность металла электронного пучка ( $P_{пад} \approx P_0$ ), Вт;

$P_y$  - установленная мощность ЭЛУ, Вт;

$\eta_n$  - КПД источника питания;  $\eta_n = 0,85 - 0,95$ ;

$\eta_{п}$  - КПД электронной пушки;  $\eta_{п} = 0,96 - 0,98$ ;

$\eta_{пр}$  - КПД преобразования кинетической энергии ускоренных электронов в тепло;  $\eta_{пр} = P_{пад} / P_0$ .

Тепловой КПД ЭЛУ  $\eta_{т} = P_{пол} / P_{пад}$  зависит от теплофизических свойств переплавляемого металла и требуемого перегрева; для работающих установок  $\eta_{т} = 0,1 - 0,15$ .

Общий (энергетический) КПД электронно-лучевой установки  $\eta_{об} = \eta_{\Sigma} \eta_{т} = 0,06 - 0,12$ .

Удельный расход электроэнергии в ЭЛУ составляет 1000-2000 кВтч/т, что превышает удельный расход электроэнергии в ВДП.

Применение электронно-лучевого нагрева в промышленности вызвано необходимостью получения требуемой самой высокой степени рафинирования металла. Использование промежуточных емкостей при переплаве и применение мощных вакуумных насосов позволяет поднять производительность ЭЛУ и их экономичность.

## 6.2 Конструкции электронно-лучевых установок

Несмотря на большое разнообразие конструкций, ЭЛУ состоят из рабочей камеры, электронных пушек, кристаллизатора, механизмов подачи и выгрузки слитка, систем создания вакуума и водоохлаждения.

Как правило, ЭЛУ характеризуются типом электронных пушек, их расположением, способом подачи переплавляемого материала и системами управления лучом.

Основным узлом ЭЛУ является электронная пушка, представляющая собой устройство, в котором пучок электронов, эмитируемых разогретым катодом, формируется в электрическом и магнитном полях в луч, который, ускоряясь в электрическом поле, выводится через отверстие в аноде и направляется на нагреваемый объект.

Многочисленным семейством ЭЛУ являются плавильные установки. Наиболее простая конструкция электронной плавильной установки показана на рис. 6.2, а. Это – установка с *кольцевым катодом*, у которой анодом служит сам расплавляемый металл. Катод  $K$  представляет собой нагретую до 2500 К протекающим через нее током вольфрамовую спираль. Анодом  $A$  является расплавляемый электрод и жидкометаллическая ванна, находящаяся в верхней части слитка, который образуется в кристаллизаторе.

Катод окружен молибденовым экраном  $\Sigma$ , находящимся под тем же потенциалом. Электроны, выходящие из катода, отталкиваются экраном и в виде кольцевого пучка устремляются на электрод и жидкометаллическую ванну слитка. Конец электрода под действием бомбардирующих его электронов расплавля-

ется, и металл каплями стекает в ванну. Поднимая и опуская электрод, можно изменять количество попадающих на него электронов, например, приподнять его так, чтобы полностью прескратить его плавление; в этом случае металл в ванне будет перегреваться или выдерживаться при постоянной температуре (в зависимости от тока, а следовательно, и мощности пучка).

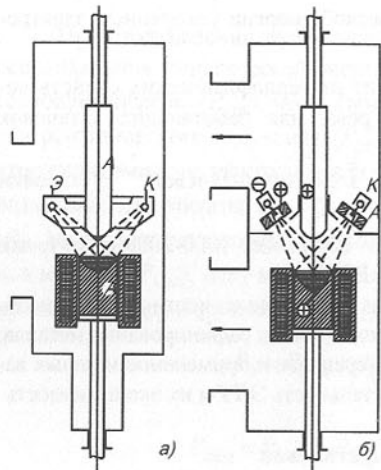


Рисунок 6.2 – Схема ЭЛУ с кольцевым катодом (а) и радиальными пушками (б)

Печи с кольцевым катодом работают на напряжении 5-15 кВ. Их преимущество – простота устройства и большая проводимость, благодаря чему здесь можно получить пучок при низком напряжении. Кроме того, по сравнению с другими типами ЭЛУ с кольцевым катодом отличаются и более высоким КПД – расход энергии на плавление металла в них на 10-15 % меньше, чем в установках других типов. Это объясняется тем, что в установках с кольцевым катодом положительный потенциал приложен непосредственно к нагреваемому металлу, и поэтому исключено отражение электронов от поверхности металла. Электрическое поле тормозит отраженные электроны и возвращает их к поверхности металла, что предотвращает унос энергии из зоны нагрева. В связи с этим ЭЛУ такого типа иногда называют печами *автоэлектронного нагрева*.

Однако, наряду с очевидными преимуществами эти печи имеют и серьезные принципиальные недостатки, делающие их ненадежными в эксплуатации. Нестабильность их работы обусловлена в основном двумя причинами:

1) ввиду близкого расположения катода от поверхности нагреваемого металла в случае повышения газовой выделений или испарения электронный разряд легко переходит в дуговой. Появление высоковольтной дуги может привести к выходу из строя катода и электрооборудования установки;

2) близкое расположение катода от жидкого металла обуславливает попадание на катод паров переплавляемого металла (атомов, положительных ионов), которые, оседая на нем, сильно снижают его эмиссионную способность. Кроме этого, попадание на катод паров легкоплавкого металла приводит к его перегоранию, поэтому срок службы кольцевых катодов ограничен и составляет всего несколько часов. Выход катода из строя прерывает плавку, снижает производительность установки и ухудшает качество металла.

Вследствие этих недостатков ЭЛУ с кольцевым катодом распространение не получили.

ЭЛУ с *радиальными пушками* (рис. 6.2, б) в меньшей мере подвержены этим недостаткам. В этих установках вокруг электрода по радиусу установлено несколько катодов и анодов с отверстиями, через которые движущиеся прямоли-

нейно электроны проходят к концу электрода и к ванне. Таким образом, здесь анод отделен от расплавленного металла, хотя и тот, и другой находятся под одинаковым потенциалом. Анод является направляющим и формирующим устройством. Устройство, состоящее из катода и направляющего пучок электронов анода, носит название *электронной пушки*.

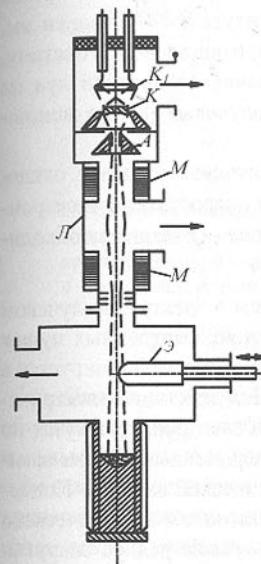


Рисунок 6.3 – Схема ЭЛУ с аксиальной пушкой

Радиальные пушки работают при относительно низком ускоряющем напряжении (около 15 кВ), поэтому они имеют ограниченную мощность. Для увеличения мощности всей ЭЛУ необходимо увеличить количество радиальных пушек, что приводит также к повышению надежности работы установки. Повышать мощность ЭЛУ за счет увеличения ускоряющего напряжения не целесообразно, т. к. это приводит к увеличению мощности рентгеновского излучения, а, следовательно, к усложнению защиты обслуживающего персонала.

Наибольшее распространение в настоящее время в качестве плавильных агрегатов получили ЭЛУ с *аксиальными пушками* (рис. 6.3).

Аксиальная пушка образует сильно сфокусированный электронный луч. Она имеет два катода. Основной катод *К* представляет собой массивную вогнутую снизу вольфрамовую пластину диаметром 2,5-4,0 см, разогреваемую до 2300-2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода *К1*, выполненного в виде нагреваемой током проволочной вольфрамовой спирали.

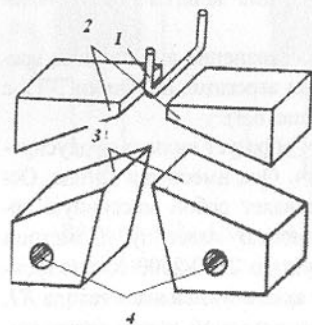
Между обоими катодами приложено напряжение 3,5-5,0 кВ; вспомогательный катод относительно основного имеет отрицательный потенциал, так что основной катод является анодом для вспомогательного. Анод *А* имеет специальную форму с тем, чтобы создать в пространстве между ним и катодом такое электрическое поле, которое сфокусировало бы электронный пучок так, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода. Выйдя из анода, электронный пучок попадает в лучепровод *Л*, который соединяет катодную камеру с плавильной камерой *П* установки. В последней находится электрод *Э*, который может перемещаться горизонтально: его можно вводить под пучок или выводить его конец из-под него. Часть электронов пучка проходит мимо конца электрода и попадает на поверхность жидкометаллической ванны, расположенной внизу плавильной камеры в кристаллизаторе.

Задача лучепровода – защитить катодный узел от прорыва в него газов из плавильной камеры. Для этой цели лучепровод откачивается своим насосом помимо насосов, откачивающих катодный узел и рабочую камеру. Диафрагмы внизу лучепровода также затрудняют поступление газов по нему вверх. Так как на своем пути через лучепровод электронный пучок расширяется, производится его до-

полнительная магнитная фокусировка (сжатие) с помощью магнитных линз  $M$  (соленоидов). ЭЛУ с аксиальными пушками работают при ускоряющих напряжениях 30-40 кВ.

Промежуточное положение между ЭЛУ с радиальными и аксиальными пушками занимают установки с *плосколучевыми пушками*. Плосколучевые пушки с отклонением луча на угол до  $60^\circ$  разработаны в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР (рис. 6.4). Пушка имеет магнитную отклоняющую систему, расположенную за ускоряющим анодом, которая поворачивает плоский луч на плавящийся металл. В настоящее время созданы плосколучевые пушки мощностью 15, 35, 70, 100 и 150 кВт.

Фирмой Stauffer-Temescal (США) создана плосколучевая пушка с отклонением электронного пучка на  $180^\circ$ . Труднопреодолимым недостатком электронной установки с плосколучевой пушкой является сложность создания необходимого вакуума в зоне формирования пучка.



- 1 – катод;
- 2 – прикатодный электрод;
- 3 – ускоряющий анод;
- 4 – водяное охлаждение анода

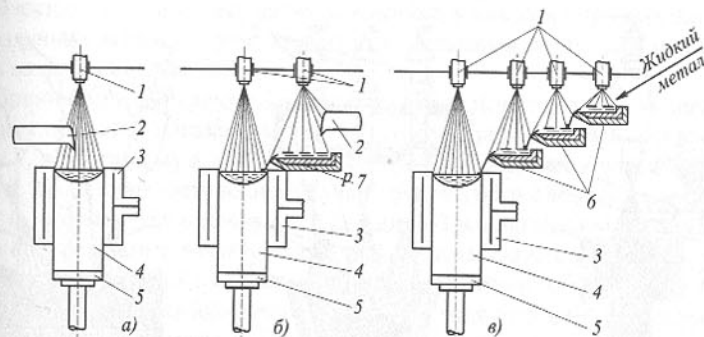
Рисунок 6.4 – Элемент плосколучевой пушки

### 6.3 Технологическое применение электронно-лучевого нагрева

Основные технологические операции электронно-лучевой обработки можно условно подразделить на четыре группы: *плавка* (технологические операции плавки в вакууме, локального переплава); *испарение* (испарение в вакууме, размерная обработка электронным лучом); *термообработка* (без изменения агрегатного состояния вещества); *сварка*.

Новым направлением в электронно-лучевом нагреве является применение электронных пушек *магнитного типа*, в которых пучок формируется в одном магнитном поле. Под действием электрического и магнитного полей электроны движутся по винтовой траектории с переменным шагом зависящим от разброса кинетической энергии. Подбором напряженностей магнитного и электрического полей можно установить такой радиус закрутки электронов, который исключает попадание их на анод. Таким образом, при той же мощности в магнетронной пушке можно снизить ускоряющее напряжение. Магнетронные пушки менее чувствительны к точности юстировки электродов и установки катода.

*Плавильные ЭЛУ* применяются главным образом для переплавки стали, молибдена, ниобия и других тугоплавких и химически активных металлов. Их мощность составляет от 50 (в лабораторных условиях) до 2000 кВт.



а – капельного переплава; б – с промежуточной емкостью; в – с холодным подом  
1 – электронно-лучевая пушка; 2 – расплавляемая заготовка; 3 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 4 – наплавляемый слиток; 5 – водоохлаждаемый поддон; 6 – водоохлаждаемый под; 7 – промежуточная емкость.

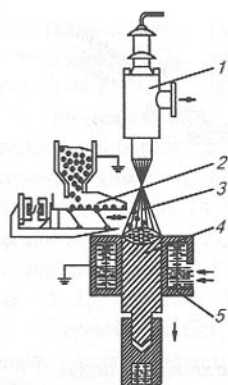
Рисунок 6.5 – Схемы электронно-лучевых плавильных печей

*Плавка* электронным лучом в вакууме применяется в тех случаях, когда необходимо получить особо чистые металлы. По технологическому назначению плавильные ЭЛУ делятся на три группы: переплавные, рафинировочные и литейные. В *переплавных* установках применяется так называемый «капельный переплав» т. е. процесс, при котором капли расплавленного металла с заготовки 2 попадают непосредственно в кристаллизатор 3 (рис. 6.5, а). В электронных рафинировочных установках с *промежуточной емкостью* (рис. 6.5, б) металл с переплавляемой заготовки 2 сначала стекает в промежуточную емкость 7, а затем в кристаллизатор 3. Этим обеспечивается развитая реакционная поверхность и соответственно эффективное рафинирование металла и одновременное повышение производительности. Металл, выплавленный таким способом, обладает более высокой степенью однородности по составу.

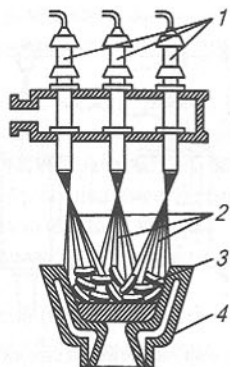
В электронных *холодноподовых печах* (рис. 6.5, в) рафинирование происходит во время протекания жидкого металла по системе подов 6, поверхность которых может быть футерована огнеупорным кирпичом или иметь затвердевший слой металла (гарнисаж). Жидкий металл на всем своем пути до кристаллизатора 3 подогревается электронными пушками 1. Исходный металл может подаваться в жидком состоянии извне с помощью специального барометрического затвора или плавиться индукционным, электродуговым или электронно-лучевым способом непосредственно в вакуумном объеме самой печи.

*Рафинировочные* электронные установки с промежуточной емкостью и холодным подом пока не нашли столь же широкого применения, как переплавные установки.

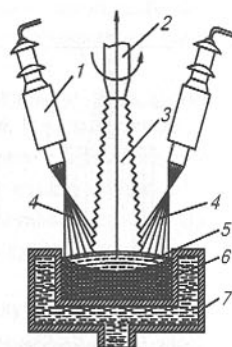
Различные установки электронно-лучевой плавки показаны на рис. 6.6-6.8. Переплавляемый металл (рис. 6.6-6.7) в виде порошка, гранул или мелкого металлолома подается в установку, где он подвергается обработке одной или несколькими пушками.



1 – электронная пушка;  
2 – переплавляемый порошок;  
3 – электронный луч;  
4 – переплавленный слиток;  
5 – водоохлаждаемый кристаллизатор



1 – электронные пушки;  
2 – электронные лучи;  
3 – переплавляемый металлолом;  
4 – водоохлаждаемая форма



1 – электронная пушка;  
2 – затравка;  
3 – монокристалл;  
4 – электронный луч;  
5 – расплав переплавляемого материала;  
6 – переплавляемый материал;  
7 – водоохлаждаемый тигель

Рисунок 6.6 – Схема ЭЛУ для переплавки порошка

Рисунок 6.7 – Схема ЭЛУ для переплавки металлолома

Рисунок 6.8 – Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов

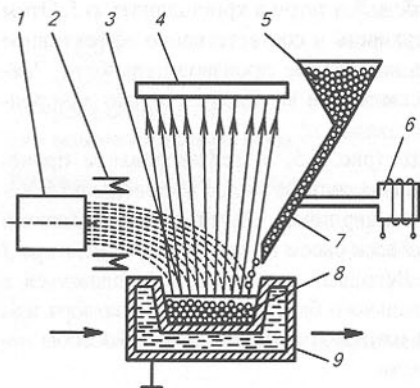


Рисунок 6.9 – Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки

Это позволяет испарять материалы из водоохлаждаемых тиглей, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами.

Электронно-лучевая плавка удобна при выращивании монокристаллов (рис. 6.8), когда на затравку 2 наплавляется материал 5 из тигля 7 и вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла 3.

Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом широко используют для получения тонких пленок. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого материала.

Электронно-лучевое испарение применяют в микроэлектронике для нанесения различных металлических покрытий на стальную ленту, для изготовления фольги из псевдосплавов сложного состава и т.д.

Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки для нанесения покрытий показана на рис. 6.9. Из бункера 5 испаряемый материал по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, поступает в водоохлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 1, искривляется отклоняющей системой 2 в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия луча 3 на вещество оно испаряется, частицы пара поднимаются вверх и оседают на поверхности подложки 4, образуя плотную пленку. Применение отклоняющего магнитного поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте.

Электронно-лучевая термообработка заключается в локальном нагреве обрабатываемых участков поверхности с целью получения структурных превращений материала. Она применяется также для отжига материалов в вакууме, повышая их пластичность и очищая поверхность от адсорбированных газов.

Технология электронно-лучевой сварки будет рассмотрена в разд. 9.

#### 6.4 Источники и схемы электропитания электронных плавильных установок

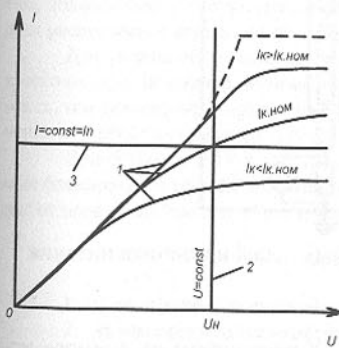


Рисунок 6.10 – Вольт-амперная характеристика ЭЛУ ( $I$ ) и внешние характеристики источника напряжения (2) и тока (3)

Для питания ЭЛУ используются высоковольтные источники питания постоянного тока. Они состоят из повышающих трансформаторов и высоковольтных выпрямителей, собираемых на тиратронах, селеновых элементах или кремниевых диодах.

В системах электроснабжения ЭЛУ выделяются основные и вспомогательные цепи. К основным относятся цепи накала катода, питания преобразователя постоянного тока, а также цепи питания, получения, измерения и контроля вакуума; к вспомогательным – цепи фокусировки, отклонения и развертки электронного луча.

Вольт-амперные характеристики промышленных ЭЛУ в диапазоне рабочих напряжений вблизи номинального  $U_{ном}$  (рис. 6.10)

отличаются от теоретической (6.5) из-за искажений электрического поля в электронной пушке и неравномерности нагрева ее катода. Управление изменением мощности ЭЛУ возможно либо путем изменения ускоряющего напряжения, либо (при работе вблизи зоны насыщения) изменением температуры катода.

В соответствии со спецификой работы электронной пушки в электротехнологических установках наиболее рациональным является режим источника питания со стабилизацией напряжения и тока в нагрузке, т. е. режим источника ЭДС ( $U=const$ ) или источника тока ( $I=const=I_n$ ).

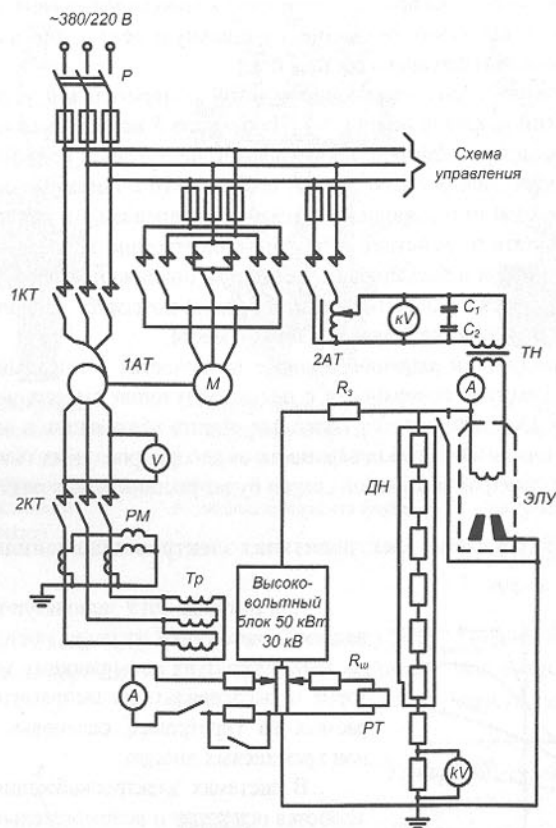


Рисунок 6.11 – Схема силовых и измерительных цепей источника питания мощностью 50 кВт

Принцип построения источников питания ЭЛУ рассмотрим на примере источника питания мощностью 50 кВт (рис. 6.11). На первичные обмотки силового трансформатора  $Tr$  через рубильник  $P$ , предохранители, контактор  $1КТ$ , регулировочный автотрансформатор  $1АТ$  и контактор  $2КТ$  подается трехфазное напряжение 220В (при соединении первичной обмотки в треугольник) или 380В (при соединении ее в звезду). Вторичная обмотка трансформатора  $Tr$  секционирована. Начальные и конечные выводы вторичных обмоток трансформатора присоединены к последовательно соединенным селеновым элементам выпрямителя (высоковольтный выпрямительный блок  $БВ$ ), что обеспечивает равномерное распределение напряжения по элементам и дает возможность получить выпрямленное напряжение с пульсациями 3,0-3,5%. При параллельном соединении выпрямительных блоков напряжение на выходе источника равно 15 кВ, при последовательном 30 кВ.

Выпрямительный блок имеет защиту с помощью предохранителей и максимальных реле  $PM$  со стороны переменного тока, и реле постоянного тока  $PT$ , включенного на шунт  $R_{ш}$ , через который протекает полный ток нагрузки блока.

Трансформатор  $ТН$  прямого накала катода, имеющего изоляцию вторичной обмотки на 30 кВ, установлен на главном выпрямительном блоке и служит одновременно проходным изолятором. Ток накала катода регулируют в данном случае вручную с помощью автотрансформатора  $2АТ$ .

Вся коммутационная и защитная аппаратура расположена в шкафу управления. На пульте управления расположены кнопки управления, световая сигнализация, автотрансформатор  $2АТ$  и контрольно-измерительные приборы: вольтметр первичного напряжения  $V$ , вольтметр выпрямленного высокого напряжения  $KV$ , амперметр постоянного тока. Источник питания имеет КПД около 84%.

**Техника безопасности.** Основными эксплуатационными недостатками ЭЛУ являются наличие высокого напряжения на установке и сложность управления и наладки ЭЛУ. Работа персонала на ЭЛУ должна соответствовать действующим правилам устройства и эксплуатации электроустановок, а также инструкциям и правилам эксплуатации конкретной установки.

К эксплуатации ЭЛУ допускается только высококвалифицированный персонал, имеющий опыт работы с высоковольтным оборудованием.

В связи с использованием высокого напряжения корпус ЭЛУ должен быть тщательно заземлен. Все токоведущие части установки, находящиеся под высоким напряжением, должны быть изолированы и закрыты защитным ограждением. Двери, открывающие доступ к этим частям, должны иметь электрическую блокировку. Все электрооборудование силового питания следует располагать в отдельном помещении.

Для защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения применяют экраны, изготовленные из свинца. Можно использовать обычные строительные материалы (чем больше масса, тем сильнее экранирование). При  $U_{пуск} < 20$ кВ достаточную защиту от рентгеновского излучения создает кожух рабочей камеры ЭЛУ.

При создании ЭЛУ в конструкции установки должны быть предусмотрены все необходимые блокировки и устройства сигнализации и защиты, предупреждающие и защищающие персонал от поражения током и рентгеновским излучением.

#### Вопросы для самопроверки

1. Для чего применяется электронно-лучевой нагрев?
2. В чем преимущество метода электронно-лучевого нагрева?
3. Какие недостатки имеет электронно-лучевой нагрев?
4. Физическая сущность электронно-лучевого нагрева.
5. Как распределяется кинетическая энергия пучка ускоренных электронов при их столкновении с поверхностью металла?
6. Как определяется электрический КПД всей ЭЛУ?
7. Из каких элементов состоит ЭЛУ?
8. Конструкция плавильных ЭЛУ с кольцевым катодом.
9. Конструкция ЭЛУ с радиальными пушками.
10. Конструкция и принцип работы ЭЛУ с аксиальными пушками.
11. Каков принцип действия электронных пушек магнетронного типа?
12. В чем заключается технологическое применение электронно-лучевого нагрева?
13. Какие основные технологические операции электронно-лучевой обработки?
14. Где применяются электронно-лучевое испарение.
15. Как можно изменять мощность ЭЛУ?
16. Как осуществляется защита персонала от рентгеновского излучения и от высокого напряжения?



## 7 УСТАНОВКИ ИОННОГО НАГРЕВА

Принцип работы установок ионного нагрева состоит в физико-химическом воздействии на обрабатываемые детали, находящиеся под отрицательным потенциалом, потока положительных ионов. Ионы, бомбардирующие поверхность деталей, нагревают их, диффундируют в поверхность их и образуют химическое соединение с материалом детали.

Источником ионов является *тлеющий разряд* или *электрическая дуга*. Энергия ионов достигает сотен тысяч электрон-вольт.

Установки применяются для получения износостойких и упрочняющих слоев, образуемых при скоростях диффузии в поверхность, превышающих скорости осаждения, и для нанесения покрытий, образуемых при скоростях осаждения, превышающих скорость диффузии.

### 7.1 Установки для получения диффузионных слоев

Эти установки могут использоваться для азотирования, цементации, нитроцементации, борирования и т. д.

Наиболее широкое промышленное применение получили установки ионного азотирования деталей машин и инструмента.

В сравнении с обычным газовым методом азотирования в электропечах сопротивления ионное азотирование позволяет сократить время процесса в 3-5 раз.

К преимуществам ионного азотирования относятся также уменьшение деформации азотируемых деталей, понижение хрупкости слоя, возможность азотирования высокохромистых сталей, недостаточно активно взаимодействующих с рабочим газом в печах с газовым азотированием, простота защиты отдельных участков деталей от азотирования (путем экранирования), снижение расхода электроэнергии в 1,5-2 раза и рабочего газа в 30-50 раз, улучшение условий труда.

Конструктивно установки выполняются, как правило, шахтного и колпакового типа.

Схема шахтной ионной установки представлена на рис. 7.1. Она состоит из двух попеременно работающих герметичных камер 1, каждая из которых снабжена центральным электродом 2, на котором подвешены обрабатываемые детали 3. Электрод вводится в камеру через высоковольтный изолятор 4, обеспечивающий электрическую изоляцию электрода и герметизацию ввода. Камеры откачиваются откачивающим насосом 5. Подача рабочего газа осуществляется от газоприготовительной установки 6 через натекатель, позволяющий регулировать количество подаваемого газа таким образом, чтобы давление в камере поддерживалось в пределах  $10^2$ - $10^3$  Па.

Источники питания установки 7, 8 обеспечивают выпрямление переменного тока, получение требуемого напряжения и его регулирование в широких пределах.

Загрузка и выгрузка собранных на приспособлении деталей осуществляется через загрузочное отверстие, закрываемое крышкой 9.

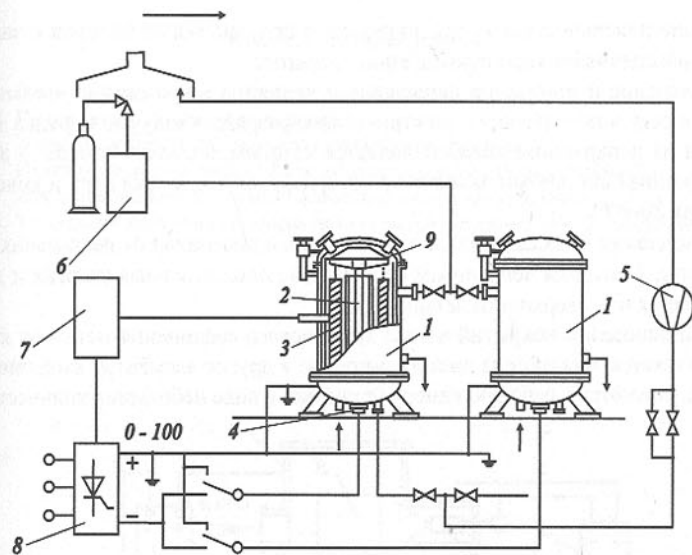


Рисунок 7.1 – Схема шахтной установки электропечи ионного азотирования

Сильноточный тлеющий разряд горит между деталями (катодом) и стенами камеры (анодом), причем основное падение потенциала происходит (и, соответственно, основная часть энергии выделяется) в прикатодной области разряда толщиной около 1 мм. Эта энергия обеспечивает непрерывную ионизацию газа, нагрев деталей путем бомбардировки ионами и их диффузию в поверхность.

Рабочим газом в установках ионного азотирования является диссоциированный аммиак либо азотоводородная смесь с добавлением аргона и метана.

В начальной стадии процесса ионного азотирования тлеющий разряд горит беспокойно, переходя у поверхности деталей в микродуги, возникающие в связи с возгоном загрязняющих поверхность детали веществ. После очистки поверхности от загрязнений разряд стабилизируется. Таким образом, при ионном азотировании достигается высокая степень очистки деталей от загрязнений и окислов.

### 7.2 Установки для нанесения покрытий

Эти установки используются для нанесения покрытий из металлов, в том числе химически активных и тугоплавких, а также из окислов, нитридов, карбидов и т. д. на инструмент и детали машин.

Свойства покрытия определяются материалом и технологией его нанесения. Например, покрытие режущего инструмента (резцов, сверл и др.) нитридом титана повышает их износостойкость в несколько раз.

При нанесении упрочняющих покрытий методом ионного осаждения благодаря бомбардировке поверхности детали (подложки) потоком ионов происходит

распыление поверхностного слоя подложки и его очистка от окислов и загрязнений, что обеспечивает хорошую адгезию покрытия.

Испарение и ионизация напыляемого вещества (образование плазмы) происходит в результате дугового электрического разряда в вакууме порядка  $10^{-4}$  Па. Электрод из испаряемого металла является катодом, а стенки камеры – анодом. Степень ионизации плазмы зависит от материала катода и тока дуги и колеблется в пределах 20-90%.

К подложке прикладывается отрицательный потенциал от нескольких сот до тысяч вольт, благодаря чему ионам сообщается дополнительная энергия и до 80% их осаждается на поверхности детали.

При нанесении покрытий в виде химического соединения металлов катодом обычно является электрод из чистого металла; а другие элементы, входящие в соединение, подаются в рабочую камеру установки в виде небольших количеств газа.

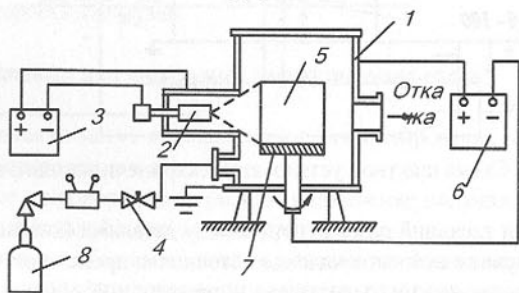


Рисунок 7.2 – Схема установки для нанесения покрытий методом ионного осаждения

Большая энергия ионов вблизи подложки активизирует реакцию химического взаимодействия ионов с газами, благодаря чему на поверхности подложки образуется покрытие требуемого состава.

Конструкция установки для нанесения покрытий методом ионного осаждения вещества приведена на рис. 7.2.

Герметичная рабочая камера 1 снабжена испарителем 2, в котором происходит горение дуги. Детали 5, на которые наносятся покрытия, помещаются на стол 7. Для получения равномерного со всех сторон покрытия детали стол в течение времени осаждения вращается. От газового баллона 8 через натекатель 4 обеспечивается постоянная подача рабочего газа в камеру. При этом система автоматически должна обеспечить регулирование потока газа таким образом, чтобы давление оставалось постоянным. Источники питания 3 и 6 обеспечивают горение электрической дуги и поддержание требуемого потенциала на подложке.

Поскольку энергия потока ионов на напыляемые изделия велика, во избежание их перегрева должен быть обеспечен постоянный контроль температуры изделий.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит принцип работы установок ионного нагрева?
2. Применение установок ионного нагрева.
3. В чем заключаются преимущества ионного азотирования?
4. Из каких элементов состоит и как работает ионная шахтная установка?
5. Для нанесения каких покрытий используются ионные установки?
6. Технология нанесения упрочняющих покрытий методом ионного осаждения.

## 8 ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

### 8.1 Физические основы работы лазера

**8.1.1 Основные представления квантовой электроники.** В основе работы оптического квантового генератора-лазера лежит генерация монохроматических (близких по частоте) волн оптического диапазона под воздействием индуцированного (вынужденного) излучения атомов и молекул, которое было предсказано Альбертом Эйнштейном еще в 1916 году. Он полагал, что между средой, состоящей из молекул, атомов, электронов и светом постоянно происходит обмен энергией в результате порождения одних и уничтожения других квантов (фотонов) света. Среда может как поглощать и рассеивать, так и, при определенных условиях, усиливать падающее на нее излучение. Причем излучение может быть как спонтанным (самопроизвольным), так и стимулированным (вынужденным).

Для правильного понимания работы лазеров рассмотрим элементарные основы квантовой электроники, в соответствии с которой электромагнитное излучение, генерируемое лазером, имеет двойную природу: с одной стороны, излучение представляет собой электромагнитные волны, т.е. колебания электрического и магнитного полей, с другой – обладает корпускулярными свойствами.

Волновые свойства излучения характеризуются частотой  $\nu$  (число периодов колебаний электрического и магнитного поля в 1 с) и длиной волны  $\lambda$  (расстояние между максимумами волн). Волна распространяется с постоянной скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Для всех типов электромагнитного излучения справедливо соотношение  $\lambda \cdot \nu = c$ , из которого видно, что с возрастанием частоты уменьшается длина волны излучения.

Корпускулярная природа света заключается в том, что излучение может быть представлено как поток дискретных квантов энергии фотонов. Каждый фотон несет определенное количество энергии, определяемой из соотношения

$$E = h\nu = hc / \lambda, \quad (8.1)$$

где  $h$  - постоянная Планка;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Внутренняя энергия атомов и молекул может принимать целый ряд фиксированных значений, характерных для данного типа атомов и молекул, которые называются уровнями энергии  $E_0, E_1, E_2$  и т. д. Весь набор допустимых энергий принято называть *энергетическим спектром микросистемы (системы)*.

В состоянии термодинамического равновесия распределение атомов по различным энергетическим уровням в соответствии с законом Больцмана описывается выражением

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1) / kT}, \quad (8.2)$$

где  $N_1, E_1, N_2, E_2$  - соответственно количество и энергия атомов на уровне 1 и 2;  
 $k$  - постоянная Больцмана;  $k = 5,67 \cdot 10^{-5}$  г/(с<sup>3</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $T$  - абсолютная температура.

Числа  $N_1, N_2, \dots, N_n$  - называют *заселенностями* уровней энергии.

Если на уровне 2 энергия больше, то заселенность этого уровня ниже при любой возможной температуре замкнутой системы. При переходе атома (молекулы) с более высокого уровня энергии  $E_2$  на более низкий  $E_1$  частицы излучают электромагнитные волны, частота которых определяется соотношением

$$\nu = (E_2 - E_1) / h. \quad (8.3)$$

При переходах на более высокие энергетические уровни частицы могут поглощать электромагнитные волны такой же частоты.

При переходах между определенными энергетическими уровнями атомной или молекулярной системы наблюдается *лазерный эффект*. Этими же переходами определяются и три различных процесса взаимодействия излучения с веществом – флюоресценция (люминесценция), поглощение и вынужденное индуцированное излучение (рис. 8.1).

Для *флюоресценции* характерен *спонтанный (самопроизвольный)* переход возбужденного атома только с верхнего энергетического уровня на нижний. При этом атом излучает фотон с энергией  $h\nu$  и вектором импульса произвольного направления (рис. 8.1, а). При *поглощении* света фотон взаимодействует с атомом (молекулой), находящимся на нижнем энергетическом уровне, переводя его на верхний уровень (рис. 8.1, б).

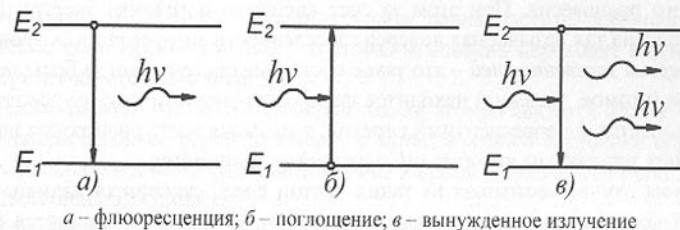


Рисунок 8.1 – Схема процессов взаимодействия излучения с веществом

При *вынужденном (индуцированном) излучении* возбужденный атом, находящийся на верхнем энергетическом уровне, под действием приходящего излучения с частотой  $\nu$  выделяет избыточную энергию и переходит на более низкий энергетический уровень. Приходящий фотон должен иметь энергию, соответствующую энергетической разности между начальным возбужденным состоянием и конечным состоянием с меньшей энергией. В результате такого взаимодействия фотона с атомом (молекулой) появляются два фотона. Оба фотона имеют одну и ту же частоту и распространяются в одном и том же направлении. Фактически наблюдается усиление интенсивности падающего излучения (рис. 8.1, в).

Так как для данной плотности потока излучения частотой  $\nu$  вероятность перехода с уровня  $1$  на уровень  $2$  (поглощение излучения) равна вероятности перехода с уровня  $2$  на уровень  $1$  (индуцированное излучение), то с учетом спонтанного перехода с уровня  $2$  на уровень  $1$  в состоянии равновесия должно выполняться условие

$$N_{1 \rightarrow 2} = N_{(2 \rightarrow 1)\text{инд}} + N_{(2 \rightarrow 1)\text{сп}},$$

где  $N_{1 \rightarrow 2}$  - число индуцированных переходов с уровня  $1$  на уровень  $2$ ;  
 $N_{(2 \rightarrow 1)\text{инд}}$ ,  $N_{(2 \rightarrow 1)\text{сп}}$  - число переходов с уровня  $2$  на уровень  $1$  соответственно индуцированных и спонтанных.

Таким образом, число индуцированных переходов

$$N_{(2 \rightarrow 1)\text{инд}} = N_{1 \rightarrow 2} - N_{(2 \rightarrow 1)\text{сп}}.$$

Поэтому даже при одинаковом числе атомов с состояниями  $1$  и  $2$  число индуцированных переходов меньше числа поглощений на величину спонтанных переходов и даже при одинаковой заселенности уровней  $1$  и  $2$  преобладает процесс поглощения излучения. Но в соответствии с условием (8.2) заселенность уровня  $2$  меньше. По этой же причине электромагнитные волны резонансной частоты, взаимодействуя с такими же частицами, рассеивают свою энергию и затухают.

Чтобы индуцированное излучение преобладало над поглощением, необходимо за счет внешних сил вывести систему частиц из состояния термодинамического равновесия. При этом за счет внешнего источника энергии должна быть обеспечена так называемая инверсия заселенности энергетических уровней.

*Инверсия заселенностей* – это такое состояние системы, когда большая часть электронов (атомов, молекул) находится на верхних энергетических уровнях, с которых начинается флуоресцентный переход, а меньшая часть электронов находится на нижних уровнях, на которых он (переход) заканчивается.

В этом случае состоящая из таких частиц среда становится активной, т. е. способной усиливать волны резонансной частоты, и при этом снижается вероятность спонтанных переходов с уровня  $2$  на уровень  $1$ .

**8.1.2 Принцип работы оптического квантового генератора.** В любом оптическом квантовом генераторе (ОКГ) используется явление индуцированного излучения среды, поддерживаемой в состоянии с инверсной заселенностью уровней за счет работы стороннего источника энергии. Принцип работы ОКГ рассмотрим на примере конструкции лазера с рубиновым стержнем (рис. 8.2).

Синтетический рубиновый стержень представляет собой плавленый оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с добавкой (0,01-0,05%) атомов трехвалентного хрома.

Атомы хрома, находящиеся в состоянии покоя на нижнем энергетическом уровне, под действием испускаемых импульсной лампой фотонов возбуждаются и переходят на более высокий энергетический уровень. Для изготовления лазеров подбирают такие вещества, атомы которых переходят из возбужденного состояния в основное не сразу, а через промежуточное *метастабильное* состояние. Атомы находятся в этом состоянии до тех пор, пока они не будут вынуждены перейти в

основное состояние (время жизни от  $10^{-4}$  до 1 с). Длина волны излучаемого света при переходе из метастабильного состояния в основное равна длине волны света, благодаря которому этот переход стал возможным. В лазерах достаточно лишь одному атому перейти из метастабильного состояния в основное и испустить при этом фотон, как это стимулирует такой же переход других атомов.

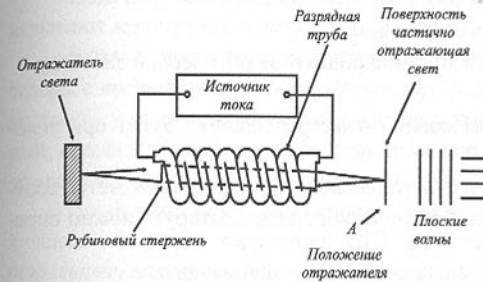


Рисунок 8.2 – Принципиальная схема лазера с рубиновым стержнем

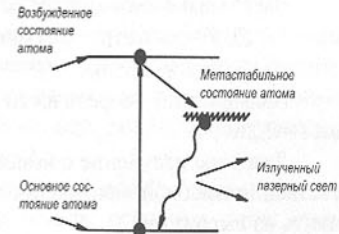


Рисунок 8.3 – Энергетическая диаграмма системы частиц

Весь процесс излучения света лазером происходит в два этапа, как показано на энергетической диаграмме (рис. 8.3). Три горизонтальных линии на этом рисунке соответствуют трем энергетическим уровням системы, а стрелками обозначены возможные переходы между ними. Нижний уровень соответствует основному состоянию атома; верхний – возбужденному, а средний – метастабильному.

Если подействовать на находящиеся в метастабильном состоянии атомы квантами световой энергии, частота которых равна частоте перехода из метастабильного состояния в основное, то атомы мгновенно переходят в основное состояние, излучая при этом энергию.

Таким образом, метастабильное состояние атомов является определяющим в работе лазера. Процесс перевода атомов в метастабильное состояние осуществляется с помощью подсветки разрядной трубки и представляет собой процесс заселения метастабильного уровня.

При вспышке разрядной трубки, подключенной к источнику питания, возбуждается активный элемент – рубиновый стержень. Возникший в нем луч усиливается, многократно отразившись от световых экранов, и выходит через поверхность, частично отражающую свет, в виде когерентного светового излучения. *Когерентным* называют излучение с одной частотой, одним направлением и с одинаковыми фазами или постоянной разностью фаз.

Часть излучаемой атомами энергии рассеивается наружу через стенки стержня. Другая часть, направленная в виде фотонов параллельно оси стержня, по пути своего движения вызывает цепную реакцию образования новых фотонов за счет взаимодействия с находящимися в стержне возбужденными атомами. Возникший поток световой энергии многократно отражается от отражателей на концах рубинового стержня, лавинообразно нарастает при каждом отражении и в конечном счете в виде мощного светового луча выходит из торца стержня в том месте, где отражатель имеет меньшую толщину.

Когерентное излучение ОКГ с помощью оптической системы линз можно сфокусировать на малую, сравнимую с длиной волны, площадку на поверхности обрабатываемого материала. Плотность потока энергии в центре площадки

$$\varphi = P \cdot D^2 / (\lambda^2 \cdot F^2) \quad (8.4)$$

где  $P$  - выходная мощность излучения лазера;

$D, F$  - диаметр и фокусное расстояние объектива оптической системы;

$\lambda$  - длина волны.

Наименьший теоретически возможный диаметр площадки будет при условии  $D=2,26F$ .

Лазерное излучение с высокой плотностью мощности сопровождается соответственно высокой напряженностью электрического поля, которую можно определить из выражения

$$E = \sqrt{\zeta \varphi}, \quad (8.5)$$

где  $\zeta$  - волновое сопротивление среды.

Так, для излучения ОКГ мощностью  $P=1$  МВт, длиной волны  $\lambda=0,69$  мкм при относительном отверстии  $D/F=1,2$ , по формулам (8.4), (8.5) получаем  $\varphi=3 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>;  $E=3 \cdot 10^{10}$  В/м. Это значение плотности потока энергии в миллион раз превышает плотность потока энергии на поверхности Солнца, а значение напряженности поля больше тех, которые связывают в атомах и молекулах внешние электроны.

При столь высоких энергиях и напряженностях поля происходит разрушение в любых веществах. Это свойство положено в основу технологического применения ОКГ.

Поскольку в лазерный луч превращается лишь незначительная часть энергии, а остальная выделяется в рабочем теле в виде тепла, то рубиновый стержень интенсивно охлаждают.

## 8.2 Классификация лазеров и их характеристики

Любой ОКГ независимо от конструктивного исполнения содержит основные элементы: 1) рабочее тело, состоящее из ансамбля атомов или молекул, на которых может быть создана инверсия заселенностей; 2) систему, позволяющую осуществлять инверсию (ее обычно называют системой *накачки*); 3) оптический резонатор; 4) устройство для вывода энергии из резонатора; 5) систему управления концентрацией энергии и пространственным положением полученного пучка света; 6) различные специальные системы, связанные с конкретным применением ОКГ.

Для инверсии заселенности в ОКГ применяют следующие виды накачки: а) *оптическую* – за счет облучения вещества мощным световым потоком; б) *электрическую*, осуществляемую при прохождении через вещество электрического тока; в) *химическую*, когда инверсия возникает за счет химической энергии, в которой принимает участие рабочее вещество и т.д.

В зависимости от характера излучаемой энергии различают лазеры с *импульсным, непрерывным и смешанным* (импульсно-периодическим) режимом работы.

По величине выходной мощности лазеры делятся: на *высокомощные* – непрерывная (средняя) выходная мощность более  $10^6$  Вт; *средней мощности* –  $10^5$ – $10^3$  Вт и *маломощные* – менее  $10^3$  Вт.

Если излучение лазера сосредоточено в узком интервале длин волн, то лазер называют *монохроматичным*, если в широком интервале – *широкополосным*.

В зависимости от конструкции открытого зеркального резонатора различают лазеры с *постоянной добротностью* (рис. 8.2) и лазеры с *модулированной добротностью* – у такого лазера одно из зеркал размещено на оси электродвигателя, который, вращая зеркало, периодически изменяет добротность резонатора от нулевого до максимального значения (лазеры с Q-модуляцией).

По физическому состоянию активного вещества, используемого для получения лазерного излучения, ОКГ делятся на четыре основных типа: *твердотельные, полупроводниковые, жидкостные и газовые*.

Лазерные установки характеризуются также длиной волны излучаемой энергии, мощностью и энергией импульса, расходимостью лазерного луча, диапазоном длин волн и коэффициентом полезного действия.

Длина *волны* лазерного излучения простирается от рентгеновского участка до дальнего инфракрасного, т. е. от  $10^{-3}$  до  $10^2$  мкм. Наиболее широкий диапазон у газовых квантовых генераторов.

*Энергия импульса* измеряется в джоулях и наибольшей величины достигает у твердотельных генераторов – порядка  $10^3$  Дж.

Энергия, излучаемая ОКГ в единицу времени дает *мощность* излучения. Газовые генераторы, которые излучают непрерывно, имеют мощность от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Вт. Для твердотельных генераторов, работающих в импульсном режиме, величина мощности зависит от длительности импульса и может достигать  $10^{12}$  Вт.

*Расходимость* лазерного луча характеризует максимальное его отклонение от оси. Наиболее узкий луч имеют газовые лазеры. Он составляет несколько угловых минут. Расходимость луча твердотельных лазеров около 1–3 угловых градусов. Полупроводниковые лазеры имеют лепестковый раскрыв излучения: в одной плоскости около одного градуса, в другой – около 10–15 угловых градусов.

Следующей важной характеристикой является *диапазон длинных волн*, в котором сосредоточено излучение, т. е. монохроматичность. У газовых лазеров монохроматичность очень высокая, она составляет  $10^{-10}$ , т. е. значительно выше, чем у газоразрядных ламп, которые раньше использовались как стандарты частоты. Твердотельные лазеры и особенно полупроводниковые имеют в своем излучении значительный диапазон частот, т. е. не отличаются высокой монохроматичностью.

Очень важной характеристикой лазеров является *коэффициент полезного действия*. У твердотельных он составляет от 0,1 до 7%, у газовых 1–15%, у полупроводниковых 40–60%. Чтобы повысить КПД необходимо охлаждать лазеры до температуры 4–77 К, а это сразу усложняет конструкцию аппаратуры.

### 8.3 Типы и конструкции лазеров

В настоящее время в различных областях науки и техники в основном применяются четыре типа лазеров: твердотельные, полупроводниковые, жидкостные и газовые.

**8.3.1 Твердотельные лазеры.** В лазерах этого типа излучателем – активным элементом – является твердое тело, выполненное в виде цилиндрического или призматического стержня. Материалом активного элемента может быть кристалл искусственного рубина, стекла с примесью редкоземельного элемента неодима или кристалла аллюмоиттриевого граната (АИГ) с добавкой 1-3% неодима.

Лазеры на рубине генерируют излучение в видимой (красной) области спектра длиной волны  $\lambda=0,6943$  мкм. КПД лазеров на рубине лежит в пределах 0,1-0,5%.

Лазеры на неодимовом стекле генерируют излучение длиной волны  $\lambda=1,06$  мкм. Главным преимуществом активных элементов из неодимового стекла является возможность изготовления стержней больших размеров (до 2 м), чем с рубиновыми кристаллами. Однако из-за сравнительно низкой теплопроводности стекла частота следования импульсов невелика ( $\approx 1$  Гц). Такие лазеры имеют КПД до 4-7%.

Лазеры на АИГ также генерируют излучение длиной волны  $\lambda=1,06$  мкм. Из-за высокой теплопроводности этой среды лазеры на АИГ могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме, причем при работе в импульсном режиме возможна очень высокая частота следования импульсов (до 100 кГц). КПД лазеров этого типа также составляет несколько процентов.

Для возбуждения активной среды в твердотельных лазерах применяется оптический метод накачки – с помощью интенсивного света газоразрядных (для импульсного режима) или дуговых (для непрерывного режима) ламп. Лампы накачки могут иметь различное конструктивное исполнение. Наиболее распространена прямолинейная конструкция. Основным наполнителем газоразрядных ламп является ксенон, в некоторых случаях – криптон.

Для повышения эффективности накачки применяют различные типы отражателей.

Принципиальная схема твердотельного оптического квантового генератора показана на рис. 8.4, а. Стержень 2, изготовленный из рабочего вещества, помещен между двумя зеркалами 1, 3. Зеркало 1 полностью отражает все падающие на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным. Для накачки энергии используется газоразрядная лампа – вспышка 6, которая для большей эффективности облучения кристалла помещена вместе с ним внутрь отражающего кожуха 4 с поперечным сечением в форме эллипса. При размещении лампы и кристалла в фокусах эллипса создаются наилучшие условия равномерного освещения кристалла. Питание лампы вспышки осуществляется от импульсного высоковольтного источника 5.

Лазерное излучение на поверхности обрабатываемой детали фокусируется с помощью сферической или цилиндрической оптики. В первом случае луч фокусируется в точку, во втором – в линию, длина которой определяется поперечным сечением луча генератора.

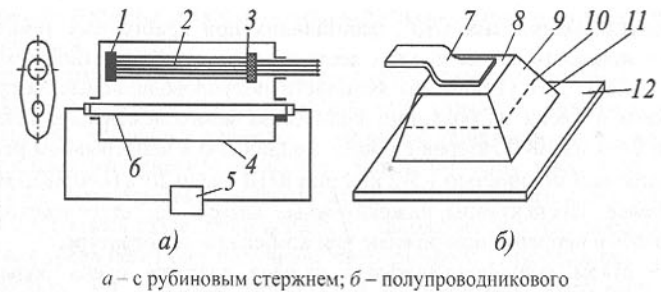


Рисунок 8.4 – Принципиальные схемы твердотельных лазеров

В процессе работы такие элементы лазера, как рабочие тела и лампы накачки, сильно нагреваются, что вызывает нестабильность или даже срыв генерации лазерного излучения. Поэтому в большинстве конструкций твердотельных ОКГ предусматривается принудительное охлаждение этих элементов воздухом, водой или жидким азотом.

**8.3.2 Полупроводниковые лазеры.** В качестве активного вещества в полупроводниковых лазерах применяют обычно арсенид галлия, а также кремний с примесью индия, фосфат галлия, арсенид индия и другие полупроводниковые материалы.

Полупроводниковые лазеры, в которых возбуждение осуществляется при инжекции носителей заряда через *p-n* переход, называют *инжекционными*. Примером лазеров такого типа может служить полупроводниковый квантовый генератор на *p-n* переходе в арсениде галлия (рис. 8.4, б). Акцепторными примесями в арсениде галлия является цинк (концентрация порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, донорными примесями – теллур (концентрация примеси примерно  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Генерация происходит на длинах волн от 0,82 до 0,9 мкм.

Кристалл инжекционного лазера, схема которого приведена на рис. 8.4, б, имеет размеры 0,5-1 мм<sup>2</sup>. Электрод 7 крепится к контакту 8, верхняя часть 9 представляет собой проводник *p*-типа, нижняя часть 11 – проводник *n*-типа. Толщина излучающей области (*p-n* перехода) 10 равна 2 мкм.

В инжекционном лазере зеркалами оптического резонатора служат отполированные верхняя и нижняя грани кристалла, ориентированные перпендикулярно плоскости *p-n* перехода, т. е. плоскости, по которой контактируют друг с другом разнородные полупроводники. Боковые грани делают скошенными для препятствия возникновению колебаний в перпендикулярном направлении. Накачка таких лазеров обеспечивается пропусканием электрического тока через полупроводниковый материал с помощью специальных электродов, соединенных с теплоотводящими пластинами 12.

Полупроводниковые лазеры могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. КПД лазеров составляет 40-50%, хотя теоретически может достигать 100%. Помимо высокого КПД к достоинствам таких лазеров относятся их малые размеры (примерно 1×1 мм).

В полупроводниковых ОКГ, работающих при криогенных температурах, достигается мощность до нескольких десятков ватт; при комнатной температуре мощность падает. Для увеличения мощности полупроводниковые лазеры могут быть собраны в блоки из большого количества многоэлементных лазеров. Так был создан блок из 1000 лазеров с общей мощностью в непрерывном режиме 30-90 Вт или пиковой мощностью 1,5-2 кВт при КПД около 20% ( $\lambda=0,8850$  мкм).

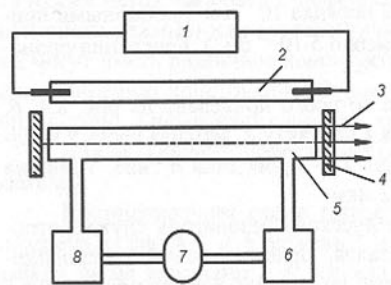
Наиболее перспективны инжекционные лазеры на гетеропереходах. Они могут работать в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Недостатком полупроводниковых лазеров является очень большая расходимость излучения – до нескольких градусов, а также трудность получения высокой монохроматичности.

**8.3.3 Жидкостные лазеры.** В этом типе лазеров в качестве активной среды используется раствор неорганических соединений редкоземельных элементов и органических красителей.

Среди лазеров на неорганических соединениях наибольшее развитие получили лазеры на растворе оксихлорида селена с примесью неодима. Такие лазеры обладают большими импульсными энергиями при значительной средней мощности, при этом они генерируют излучение длиной волны  $\lambda=3$  мкм при оптической накачке лампами-вспышками.

Очень интенсивно развиваются лазеры на органических кристаллах (рис. 8.5). В качестве красителей применяются вещества, обычно используемые при производстве тканей, пластмасс и др. Наиболее важный краситель – родамин 6G, химическая формула которого  $C_{26}H_{27}N_2O_3Cl$ . Он хорошо растворяется в метиловом спирте и воде.



1 – источники питания; 2 – лампа накачки; 3 – излучение; 4 – зеркало резонатора; 5 – кювета; 6 – емкость с растворителем; 7 – насос; 8 – теплообменник

Рисунок 8.5 – Схема жидкостного лазера

Лазеры на красителях могут работать как в импульсном режиме, так и в непрерывном. Мощность излучения у них сравнительно мала (100-200 мВт, в некоторых случаях до 1 Вт). Однако при увеличении скорости прокачки жидкости и

накачка таких лазеров может производиться как лампами-вспышками, так и газовыми лазерами (например, на азоте).

В жидкостном лазере раствор красителя с помощью насоса 7 прокачивается через кювету 5, а затем охлаждается в теплообменнике 8. КПД лазеров на красителях доходит до 50%; они обладают высокой направленностью излучения (расходимость луча не превышает 0,1 мрад).

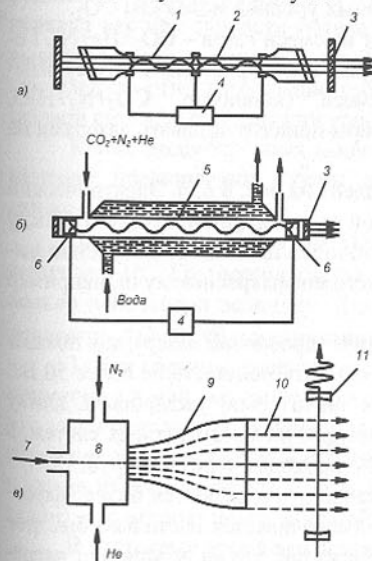
Основное достоинство жидкостных лазеров (на красителях) – возможность перестройки частоты (длины волны) от ближнего ультрафиолета (0,34 мкм) до ближайшей инфракрасной области спектра (11,75 мкм) – простой заменой кюветы с красителем.

использовании больших рабочих объемов растворов можно существенно увеличить мощность излучения.

К недостаткам жидкостных лазеров следует отнести нестойкость жидкости по отношению к большим интенсивностям света, а также изменение коэффициента преломления активного вещества в процессе генерации от нагревания. Это приводит к тому, что генерирующий луч “гуляет” по торцу резонатора.

**8.3.4 Газовые лазеры.** Для таких лазеров в качестве активного вещества используют либо смесь газов, либо вещество, находящееся в парообразном состоянии. Газовая среда облегчает получение непрерывного стимулированного излучения, поскольку для перевода вещества в возбужденное состояние требуется меньшая энергия.

Конструктивно газовые лазеры представляют собой стеклянную трубку, наполненную специальной газовой смесью. В торцы трубки вплавляют два электрода и к ним подводят напряжение от источника питания (рис. 8.6). В трубке возбуждается газовый разряд. Для газовых лазеров подбирают специальные активные смеси, атомы или молекулы которых могут некоторое время находиться в метастабильном состоянии. По сравнению с твердыми телами и жидкостями газы обладают меньшей плотностью и более высокой однородностью, что позволяет получать непрерывное лазерное излучение с более высокой монохроматичностью и когерентностью и большей направленностью – его угловая расходимость не превышает одной угловой минуты.



а – гелий-неоновый; б – углекислотный; в – газодинамический

Рисунок 8.6 – Схемы газовых лазеров

В качестве активного вещества практически можно использовать все инертные газы. Получено излучение от чистого неона, криптона, ксенона, аргона, от гелий-ксеноновой смеси, аргоно-кислородной смеси, углекислого газа, а также от паров цезия, воды, ртути.

Газовые ОКГ подразделяют на три большие группы: лазеры на атомных, ионных и молекулярных переходах.

Примером *атомного лазера* является гелиево-неоновый ОКГ (рис. 8.6, а). В этом лазере рабочим веществом являются нейтральные атомы неона. Атомы гелия служат для передачи энергии возбуждения. В результате этой передачи атомы неона возбуждаются, а атомы гелия возвращаются в основное состояние. Газоразрядная трубка 1 лазера заполняется гелием и неоном с парциальными давлениями соответственно 133 и 13 Па. От источника высокого напряжения 4 в трубке создается высоковольтный электрический разряд 2, который возбуждает атомы гелия и неона за счет соударений с электронами.

Излучение выходит через полупрозрачное зеркало 3. Гелиево-неоновый ОКГ имеет небольшую мощность 0,5-10 мВт, но из-за простоты устройства, надежности и достаточно высоких параметров излучения он получил широкое распространение.

В *ионных газовых ОКГ* используются переходы между энергетическими уровнями ионов благородных газов (ксенона, аргона, неона, криптона), а также фосфора, серы и хлора. Типичным представителем этой группы является аргоновый лазер, который по конструкции похож на гелиево-неоновый ОКГ. Мощность ОКГ этой группы выше, чем лазеров на атомных переходах. Газовый ОКГ на аргоне генерирует излучение мощностью до 150-500 Вт в непрерывном режиме.

Наибольшие мощности и КПД имеют газовые ОКГ, генерирующие колебания на *молекулярных переходах*. К этой группе относят ОКГ, работающие на углекислом газе.

В газоразрядных лазерах инверсия заселенностей достигается за счет возбуждения молекул электронным ударом и резонансной передачей энергии возбуждения. Для передачи энергии возбуждения в них служат молекулы азота  $N_2$ , которые в свою очередь возбуждаются электронным ударом. Молекулярный азот хорошо накапливает энергию возбуждения и в процессе неупругих столкновений легко передает ее молекулам  $CO_2$ . Высокая инверсия заселенностей достигается добавлением в рабочую смесь гелия He, который облегчает условия возникновения разряда и благодаря своей высокой теплопроводности охлаждает разряд, а также способствует опустошению нижних лазерных уровней молекулы  $CO_2$ .

Обычно ОКГ на углекислом газе работают на смеси газов –  $CO_2+He+N_2$ . Гелий является очень дорогостоящей и дефицитной составляющей, поэтому ищутся новые безгелиевые рабочие смеси (например,  $CO_2+N_2+H_2O$ ,  $CO_2+N_2+воздух$  и др.). Тем не менее все эти лазеры принято называть лазерами на  $CO_2$  или  $CO_2$  – лазеры.

Принципиальная схема ОКГ на  $CO_2$  приведена на рис. 8.6, б. Электрический разряд возбуждается в охлаждаемой стеклянной газоразрядной трубке 5 между электродами 6 с помощью высоковольтного источника питания 4. Излучение выводится через окно 3 из материала, пропускающего инфракрасные лучи, например из кристаллов KBr, NaCl или Ge.

При схеме ОКГ с продольной прокачкой газа (прокачной лазер), как показано на рис. 8.6, б с 1 м длины резонатора можно снимать мощность не более 50 Вт, для получения большей мощности приходится значительно увеличивать длину трубы резонатора, что достигается за счет использования многотрубных систем, в которых луч с помощью зеркала последовательно проходит через ряд труб.

Газовые  $CO_2$  – лазеры с поперечной прокачкой газа являются более эффективными, чем с продольной. В таких лазерах обеспечивается настолько быстрое прохождение рабочего газа через разрядный промежуток, что он не успевает нагреваться под действием тока разряда до критических температур, а это дает возможность увеличить энергию возбуждения активной среды и таким образом повысить до 500 Вт мощность генерируемого лазерного излучения. Электроразрядные лазеры с поперечной прокачкой газа работают в непрерывном режиме генерации.

**8.3.5 Газодинамические лазеры.** Их характерной особенностью является создание быстрых потоков газовых масс. Инверсия заселенностей в них осуществ-

ляется не при электрическом разряде, а при резком охлаждении предварительно нагретой рабочей смеси путем адиабатического расширения газа. При нагревании газа до 1500 К и давлении молекулы переходят на верхние уровни. Но при этом сохраняется обычное больцмановское распределение по энергетическим уровням с большим заселением нижних уровней по сравнению с верхними.

При охлаждении газа молекулы должны перейти на нижние уровни. Скорость их перехода зависит от времени жизни на том или ином уровне. Поскольку время жизни верхнего лазерного уровня молекулы  $CO_2$  гораздо больше времени жизни нижнего, расселение нижнего уровня идет с большей скоростью. При адиабатическом расширении газа в сопле происходит его резкое охлаждение на выходе из сопла (до 300 К). Поэтому в различных областях среды будет иметь место различное расселение молекул по энергетическим уровням. В прилегающей к соплу зоне еще будет преобладать заселенность нижнего уровня, но на некотором расстоянии от сопла, соответствующим времени распространения струи газа до этого сечения, нижние уровни будут опустошаться быстрее верхних, и в этой зоне будет существовать инверсия заселенностей.

Принципиальная схема газодинамического лазера показана на рис. 8.6, в. В камеру сгорания 8 подается топливо 7. Продукты сгорания ( $CO_2$ ) в смеси с азотом и гелием выходят со скоростью 1500 м/с через сверхзвуковое сопло 9 в виде расширяющегося потока газа 10. Для получения лазерного излучения используется резонатор в виде двух зеркал 11. Резонатор расположен так, что его ось перпендикулярна вектору скорости потока газа. Мощность лазерного излучения в непрерывном режиме достигает более 200кВт,  $\lambda=10,6$  мкм, КПД – 10-15%. К недостаткам следует отнести большие габариты, потребление значительного количества газовой смеси, очень высокий уровень шума при работе, низкий КПД.

Кроме рассмотренных выше лазеров наибольший интерес для многих применений представляют лазеры *ультрафиолетового (УФ), рентгеновского и гамма-диапазонов*.

На основании формулы Планка  $E=h \cdot \nu$  при частоте инфракрасного излучения  $\nu=3 \cdot 10^{13}$  Гц энергия кванта лазеров на  $CO_2$  составляет  $E \approx 0,124$  эВ. т.е. довольно небольшую величину. Для УФ-излучения она равна 13,6 эВ, для рентгеновского –  $1,2 \cdot 10^3$  эВ и  $\gamma$ -излучения -  $4 \cdot 10^5$  эВ.

Таким образом, энергоемкость УФ-излучения в 109 раз, а гамма-излучения примерно в 4 млн. раз выше энергоемкости инфракрасного излучения. Это значит, что указанное коротковолновое (высокочастотное) излучение может быть сфокусировано до очень высокой степени. Следует при этом учесть, что рентгеновское и гамма-излучения обладают высокой проникающей способностью (до 15-20 см в стали), что откроет перед лазерной технологией новые возможности.

В настоящее время ряд лазеров излучают в УФ части спектра. Это лазеры на аргоне (Ar), криптоне (Kr) и смеси гелия (He) с кадмием (Cd), а также азотный ( $N_2$ ). Первые два лазера излучают в непрерывном режиме, последние – в импульсном, однако уровень мощности излучения невелик.

С точки зрения повышения мощности лазера УФ-излучения перспективны так называемые *эксимерные* лазеры на аргоне (Ar), криптоне (Kr) и ксеноне (Xe).



Эти инертные газы устойчивы только в виде одноатомных молекул. Однако при возбуждении могут образоваться связанные состояния  $Ar_2$ ,  $Kr_2$ ,  $Xe_2$ , которые называются эксимерами.

Эксимеры инертных газов при высоком давлении испускают излучение в УФ-области. Возбуждение происходит при взаимодействии с быстрыми электронами или при оптической накачке.

Эксимерный лазер представляет собой газовую камеру высокого давления (до 1 МПа). Внутри камеры установлены зеркала с диэлектрическими покрытиями. Возбуждение активной среды осуществляется импульсным пучком быстрых электронов при токе до 70 кА и энергией электронов до 1 МэВ.

При создании рентгеновских и гамма-лазеров существуют некоторые трудности. Основные из них – создание специальных резонаторов и получение активной среды.

Первая проблема, возможно, будет решена путем использования явления отражения рентгеновских и гамма-лучей от кристаллических решеток.

Для создания активной среды рентгеновских лазеров предлагается использовать плазму, возникающую при взаимодействии лазерных импульсов большой мощности с поверхностью мишени. В определенных условиях эта плазма может давать излучение в рентгеновской области.

К недостаткам таких лазеров следует отнести высокую опасность излучения в рентгеновской и гамма-области спектра для здоровья и жизни людей.

#### 8.4 Технологические применения лазеров

Мощные лазеры применяются в технологических процессах обработки различных материалов. В частности, с их помощью производят сварку, закалку, резку и сверление различных материалов без возникновения в них механических напряжений и с очень большой точностью, вплоть до нескольких длин световых волн. Лазерами обрабатывают материалы практически любой твердости, металлы, алмазы, рубины и т.д.

С помощью лазерной сварки можно соединять металлы с различными теплофизическими и химическими свойствами, а также с неметаллами.

Высокая мощность и экономичность  $CO_2$ -лазеров позволяют использовать их для разрушения сверхпрочных горных пород при работах в шахтах и тоннелях.

Лазерное излучение абсолютно стерильно, поэтому оно используется в медицине для глазных операций при остановке кровотечений; в сельском хозяйстве для предпосевной обработки семян, а также для освещения концертных площадок.

**Техника безопасности.** По условиям электробезопасности лазеры относят к электроустановкам напряжением свыше 1000 В. Поэтому на них распространяются “Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей” и “Правила устройства электроустановок”, ГОСТы и другие правила и нормы, действующие в этой области.

Требования безопасности должны быть направлены на то, чтобы предупредить возможность соприкосновения людей с токоведущими частями и образования электрических цепей, включающих тело человека. Токоведущие части эксплуатируемых установок должны иметь ограждения со специальной блокировкой, снимающей напряжение при их открывании. При использовании конденсаторных батарей небольшой емкости последние могут располагаться в од-

ном помещении с пультом управления. Батареи большой емкости должны располагаться либо в соседнем блокируемом помещении, либо вне помещения в специальном стальном шкафу. Все конденсаторные батареи должны быть обязательно экранированы и снабжены устройством для автоматического разряда конденсаторов при снятии экранов.

При эксплуатации лазерных установок имеется потенциальная опасность прямого и отраженного лазерного излучения для организма человека и в первую очередь для органа зрения. Для обеспечения безопасной работы на лазерных установках используют различные средства снижения опасных и вредных производственных факторов (лазерного излучения, аэрозолей, вредных химических веществ, шума и т.д.). Способы защиты персонала от лазерного излучения подразделяются на коллективные и индивидуальные.

**Коллективные средства** включают в себя: защитные экраны (или кожухи), препятствующие попаданию лазерного излучения на рабочие места; размещение пульта управления лазерной установкой в отдельном помещении с телевизионной или другой системой наблюдения за ходом процесса; экранирование света импульсных ламп накачки и ультрафиолетового излучения газового разряда; система блокировок и сигнализации, предотвращающие доступ персонала во время работы лазера в пределы лазерноопасной зоны; перегородки из непроницаемого для лазерного излучения материала; окраску внутренних поверхностей помещений в матовый свет; экранировку открытого луча на пути от лазера к детали.

**К индивидуальным средствам** защиты от лазерного излучения относятся: очки, щитки, маски, технологические халаты и перчатки. Средства индивидуальной защиты должны входить в комплекс мер, обеспечивающих безопасные условия труда, только в тех случаях, когда коллективные способы защиты не позволяют обеспечить безопасное ведение работ на лазерных установках.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что положено в основу работы лазеров?
2. Какую природу имеет электромагнитное излучение, генерируемое лазером?
3. Что такое энергетический спектр микросистемы?
4. Что происходит при флюоресценции, поглощении света и вынужденном индуцированном излучении?
5. Что такое инверсия заселенностей?
6. В чем заключается принцип работы оптического квантового генератора?
7. Что такое когерентное излучение?
8. Из каких основных элементов состоит ОКГ?
9. В чем заключается принцип работы твердотельных лазеров?
10. Принцип действия полупроводниковых лазеров.
11. Принцип действия жидкостных лазеров.
12. Принцип действия газовых лазеров.
13. Принцип действия ОКГ, работающих на углекислом газе.
14. Особенности и принцип действия газодинамических лазеров.
15. Конструкция эксимерных лазеров.
16. Где применяются лазеры?
17. Требования техники безопасности при эксплуатации ОКГ.
18. Что включают в себя коллективные и индивидуальные средства защиты от лазерного излучения?